

**POTENCIAL DE RELIBERACIÓN Y FRACCIONES DE CARBONO ORGÁNICO  
EN EL SUELO DEL PÁRAMO LA CORTADERA**

**ELSA LILIANA CUERVO BARAHONA**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRIA EN INGENIERIA AMBIENTAL  
TUNJA  
2019**

**POTENCIAL DE RELIBERACIÓN Y FRACCIONES DE CARBONO ORGÁNICO  
EN EL SUELO DEL PÁRAMO LA CORTADERA**

**ELSA LILIANA CUERVO BARAHONA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
MAGISTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Dirigido por:  
GERMAN EDUARDO CELY REYES  
Ingeniero Agrónomo Mg. Ciencias Agrarias**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRIA EN INGENIERIA AMBIENTAL  
TUNJA  
2019**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Tunja, 14 de octubre de 2019

## CONTENIDO

LISTA DE TABLAS .....	8
RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN .....	13
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	14
3. JUSTIFICACIÓN.....	15
4. ANTECEDENTES.....	16
4.1. CONTENIDO DE CARBONO EN SUELOS DE COLOMBIA .....	16
4.1.1. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua.....	17
4.1.2. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos .....	17
4.1.3. Determinación de fracciones de carbono edáfico en un sistema pastoril bovino de la llanura deprimida salina de Tucumán, Argentina .....	18
4.1.4. Distribución de fracciones de tamaños moleculares de ácidos húmicos y fúlvicos extraídos de andisoles .....	18
5. OBJETIVOS.....	19
5.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	19
6. MARCO TEÓRICO .....	20
6.1. ECOSISTEMAS DE PÁRAMOS .....	20
6.1.1. Generalidades.....	20
6.1.2. Clima.....	21
6.1.3. Vegetación.....	21
6.1.4. Edafofauna .....	22
6.1.5. Relieve.....	23
6.1.5. Regulación hídrica .....	24

6.1.6	Importancia de los páramos .....	24
6.2.	CAMBIO CLIMÁTICO .....	25
6.2.1.	Causas del cambio climático .....	25
6.2.2.	Efectos del cambio climático .....	26
6.2.3.	La biodiversidad y el cambio climático .....	26
6.2.4.	Efectos del cambio climático sobre el páramo .....	27
6.2.5.	Convenios internacionales relacionados con el cambio climático .....	28
6.3.	CARBONO ORGÁNICO .....	29
6.3.1.	Ciclo de carbono .....	29
6.3.2.	Carbono en el suelo .....	31
6.3.3.	Dinámica del carbono orgánico en los suelos .....	33
6.3.4.	Materia orgánica del suelo .....	33
7.	METODOLOGÍA .....	37
7.1.	DEFINICIÓN DE HIPÓTESIS, VARIABLES E INDICADORES .....	37
7.1.1.	Variables .....	37
7.2.	PRESENTACIÓN DE ETAPAS: (MUESTRAS, INSTRUMENTOS, PROCEDIMIENTOS, TÉCNICAS DE ANÁLISIS, PLANTAS PILOTOS, ACTIVIDADES Y DEMÁS ESTRATEGIAS METODOLÓGICAS REQUERIDAS PARA LA INVESTIGACIÓN) .....	37
7.2.1.	Ubicación área de estudio .....	37
7.2.2.	Diseño experimental.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
7.2.3.	Procesamiento de la muestra.....	39
7.2.4.	Calculo de carbono orgánico del suelo .....	41
7.3.	PROCESO DE RECOLECCIÓN, ORGANIZACIÓN, SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS.....	42
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	43
8.1.	CONTENIDOS DE CARBONO ORGÁNICO EN SUS DIFERENTES FRACCIONES.....	43
8.1.1.	Análisis factorial para cobertura, profundidad y fracción de carbono .	43
8.1.2.	Cobertura y profundidad.....	46
8.1.3.	Cobertura y fracción .....	47
8.1.4.	Fracción y profundidad.....	48
8.2.	DINÁMICA DE LAS FRACCIONES DE CARBONO EN PARCELAS CON TRES TIPOS DE USO DE SUELO .....	49

8.2.1 Parcela uso de suelo pastizal .....	50
8.2.2. Parcela uso de suelo vegetación nativa.....	52
8.2.3. Parcela uso de suelo agrícola - cultivos.....	54
3.2.4 Análisis de la dinámica del carbono en todas las fracciones .....	56
8.3.1 Toneladas por hectárea de CO <sub>2</sub> almacenado en la fracción de Carbono extractable .....	58
8.3.2 Toneladas por hectárea de CO <sub>2</sub> almacenado en la fracción de ácidos fúlvicos	59
8.3.3 Toneladas por hectárea de CO <sub>2</sub> almacenado en la fracción de ácidos húmicos .....	60
8.3.4 Total de toneladas por hectárea de CO <sub>2</sub> almacenado en el suelo del área de estudio del páramo la Cortadera .....	61
8.4 TENDENCIAS ESPACIALES DEL CARBONO ORGANICO PRESENTE EN LAS FRACCIONES .....	62
8.4.1 Cambios en la cobertura vegetal del Páramo de la Cortadera .....	63
8.4.2 Carbono orgánico presente en la fracción carbono extractable .....	64
8.4.3 Carbono orgánico del suelo presente en la fracción ácidos fúlvicos ..	66
8.4.4 Carbono orgánico del suelo presente en la fracción ácidos húmicos ....	68
9. CONCLUSIONES .....	71
10. RECOMENDACIONES .....	73
11. BIBLIOGRAFÍA .....	74

## LISTA DE FIGURAS

pág.

<b>Figura 1.</b> Contenido de carbono orgánico en suelos de Colombia.....	16
<b>Figura 2.</b> Ciclo del carbono .....	30
<b>Figura 3.</b> El ciclo terrestre del carbono: el carbono del suelo y el carbono global disponible.....	31
<b>Figura 4.</b> Promedio de Carbono total según la profundidad en cada cobertura ....	46
<b>Figura 5.</b> Promedio de carbono según cobertura en cada fracción.....	48
<b>Figura 6.</b> Promedio de carbono según profundidad en cada fracción .....	49
<b>Figura 7.</b> Porcentaje de C en parcela de pastizales – profundidad de 0-15cm ....	50
<b>Figura 8.</b> Porcentaje de C en parcela de pastizales – profundidad de 15-30cm ...	51
<b>Figura 9.</b> Porcentaje de C en parcela de vegetación nativa – profundidad de 0-15cm .....	52
<b>Figura 10.</b> Porcentaje de C en parcela de vegetación nativa – profundidad de 15-30cm .....	53
<b>Figura 11.</b> Porcentaje de C en parcela de cultivos – profundidad de 0-15cm .....	54
<b>Figura 12.</b> Porcentaje de C en parcela de cultivos – profundidad de 15-30cm .....	55
<b>Figura 13.</b> Toneladas de CO <sub>2</sub> almacenado – Fracción Carbono extractable.....	58
<b>Figura 14.</b> Toneladas de CO <sub>2</sub> almacenado - Fracción ácidos fúlvicos .....	60
<b>Figura 15.</b> Toneladas de CO <sub>2</sub> almacenado - Fracción ácidos húmicos .....	60
<b>Figura 16.</b> Total de toneladas de CO <sub>2</sub> almacenado –.....	62
<b>Figura 17.</b> Imagen satelital del Páramo de La Cortadera – Boyacá. Año 1.985....	63
<b>Figura 18.</b> Imagen satelital del Páramo de la Cortadera – Boyacá Año 2.017 .....	64
<b>Figura 19.</b> Carbono orgánico del suelo – Fracción carbono extractable a profundidad 0-15 cm vs profundidad 15 – 30cm .....	65
<b>Figura 20.</b> Carbono orgánico del suelo – Fracción ácidos fúlvicos a profundidad 0 - 15 cm vs. profundidad 15 – 30 cm.....	66
<b>Figura 21.</b> Carbono orgánico del suelo – Fracción ácidos húmicos a profundidad 0 - 15 cm vs. profundidad 15 - 30 cm.....	68

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Cantidad de solución .....	40
<b>Tabla 2.</b> Estadística descriptiva del carbono orgánico por cobertura .....	43
<b>Tabla 3.</b> Análisis de Varianza para Medida - Suma de Cuadrados Tipo III .....	44
<b>Tabla 4.</b> Análisis de Varianza para Medida - Suma de cuadrados de las coberturas y la profundidad .....	45



## RESUMEN

A nivel mundial existe una gran preocupación por el calentamiento global a causa del efecto invernadero, representado principalmente en el aumento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera como resultado de las actividades antropogénicas. Los páramos son ecosistemas estratégicos por la oferta de servicios ambientales que prestan, entre los que cabe resaltar la acumulación de carbono, además los ecosistemas albergan tres veces más carbono que la propia vegetación, llegando incluso a contener más cantidades que la existente en la vegetación y en la atmósfera.

Por lo anterior, se propuso estimar las fracciones lábiles y estables de carbono orgánico en el suelo de los tres ambientes presentes (área de cultivos de papa y avena, área en recuperación y área no intervenida) en el páramo La Cortadera, empleando técnicas analíticas como el método de digestión vía húmeda (Walkley – Black). A su vez se evaluó la reliberación a través de la medición del comportamiento o dinámica de las fracciones de carbono orgánico en una parcela de 2 m<sup>2</sup>, cuya cobertura vegetal fue retirada y donde mensualmente se tomaron muestras de suelo durante un periodo de cuatro meses.

Los resultados mostraron que la vegetación nativa tiene mayor concentración de carbono en comparación con las coberturas de cultivos y pastizales; siendo el carbono extractable, la fracción que presentó los valores más altos, seguido por los ácidos húmicos y fúlvicos. Se concluye que el páramo La Cortadera es un ecosistema muy vulnerable por el alto impacto antrópico, por lo tanto, se debe propender por conservarlo y protegerlo, debido a que contiene fracciones lábiles de carbono que pueden ser devueltas directamente a la atmósfera, favoreciendo el cambio climático y efecto invernadero. Los resultados serán de gran relevancia porque permitirán aportar argumentos teóricos que evidencien la necesidad de mantener, conservar y proteger los ecosistemas de páramo en nuestro municipio y por ende en el país, teniendo en cuenta el importante papel ecológico y estratégico que desempeñan.

## ABSTRACT

At the global level, there is great concern about global warming due to the greenhouse effect, mainly represented by the increase of CO<sub>2</sub> in the atmosphere as a result of anthropogenic activities. The paramos are strategic ecosystems for the supply of environmental services they provide, among which carbon accumulation is noteworthy, in addition, ecosystems harbor three times more carbon than the vegetation itself, even containing more quantities than the vegetation and in the atmosphere.

Therefore, it was proposed to estimate the labile and stable organic carbon fractions in the soil of the three present environments (area of potato and oat crops, area in recovery and unimproved area) in the La Cortadera paramo, using analytical techniques such as the method of wet digestion (Walkley - Black). In turn, the reliberation was evaluated through the measurement of the behavior or dynamics of organic carbon fractions on a plot of 2 m<sup>2</sup>, whose plant cover was removed and where soil samples were taken monthly for a period of four months.

The results showed that native vegetation has a higher concentration of carbon compared to crop and pasture coverings; being the extractable carbon, the fraction that presented the highest values, followed by the humic and fulvic acids. It is concluded that the La Cortadera paramo is a very vulnerable ecosystem due to the high anthropic impact, therefore, it should be prone to preserve and protect it, because it contains labile carbon fractions that can be returned directly to the atmosphere, favoring the change climatic and greenhouse effect. The results will be of great relevance because they will provide theoretical arguments that demonstrate the need to maintain, conserve and protect paramo ecosystems in our municipality and therefore in the country, taking into account the important ecological and strategic role they play.

## 1. INTRODUCCIÓN

Colombia, gracias a su ubicación geográfica, se destaca dentro de los diez países con mayor biodiversidad del planeta, la cual no solo se limita a un sinnúmero de especies vegetales y animales, sino también a una inmensa variedad de ecosistemas que van desde el nivel del mar hasta las potentes y silenciosas nieves perpetuas, según Galvis & Morales<sup>1</sup>.

Según el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt (citado por Galvis & Morales<sup>2</sup>) Boyacá es el departamento con mayor área de páramo, abarcando una extensión de 4807,10 km<sup>2</sup>. Corpoboyacá afirma (citado por Galvis & Morales<sup>3</sup>) que de los 123 municipios que conforman el departamento de Boyacá, 70 presentan este tipo de ecosistemas.

Morales et al.<sup>4</sup> afirman que los páramos son ambientes únicos, debido a la vegetación que los caracteriza, a las condiciones climáticas, a los suelos y a la altitud, así mismo, según Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y el Programa de las Naciones Unidas<sup>5</sup> son considerados medios estratégicos por su oferta de servicios ambientales, entre los que cabe resaltar la regulación hídrica, la biodiversidad única y el contenido de carbono acumulado que no solo está presente en la biomasa epigea sino también en los cojines de materia orgánica del suelo, como consecuencia de las bajas tasas de descomposición presentadas.

El carbono contenido en los suelos es el resultado de miles de años de producción primaria neta. Los estudios sugieren que los suelos contienen alrededor de tres veces más reservas de carbono orgánico que la biomasa vegetal y animal sobre la tierra y el doble del contenido en la atmósfera. Sin embargo, existe una gran incertidumbre acerca de la cantidad total de carbono que se encuentra en los suelos y su comportamiento al ser retirada la cobertura vegetal presente.

---

<sup>1</sup> GALVIS, M. & MORALES, M., 2010. Páramos de Boyacá: Flora representativa. Primera edición. Corpoboyacá. 226p.

<sup>2</sup> Ibid

<sup>3</sup> ibid

<sup>4</sup> MORALES M. et al. Atlas de páramos de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 2007. Bogotá, D. C. 208p.

<sup>5</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE Y PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO. Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en condición Hot Spot & Global Climatic Tensor. 2002. IDEAM – Colombia.

En lo que respecta a los contenidos de carbono atmosférico, Lal & Kimble<sup>6</sup> señalan que estos se han incrementado principalmente por dos actividades humanas: el cambio de uso de la tierra y la combustión de fósiles. Se estima que el cambio de uso de la tierra emite  $1,6 \pm 1,0$  Gt ( $1 \text{ Gt} = 1 \times 10^9 \text{ t}$ ) de carbono al año y que la combustión de fósiles emite  $5,5 \pm 0,5$  Gt de carbono al año. Esta situación se ha agravado en los últimos cien años, por lo que la comunidad científica ha concentrado gran parte de sus esfuerzos investigativos en esta área y en las últimas décadas ha sido foco de discusión entre los países.

La relevancia de la presente investigación radica en el aporte de conocimientos relacionados con la estimación de las fracciones de carbono orgánico, incluyendo aquellas formas lábiles y estables, que nos permitan determinar de forma más precisa la capacidad de secuestro de carbono en el suelo del páramo La Cortadera y establecer tendencias espaciales del comportamiento de las fracciones orgánicas determinadas. Éste estudio analizará el suelo con tres usos diferentes (cultivos, área en recuperación, área sin intervención), lo cual permitirá establecer diferencias en cuanto a su concentración y porcentajes de emisión, secuestro y dinámica.

---

<sup>6</sup> LAL, R. & KIMBLE J. Pedospheric processes and the carbon cycle. En: Lal, R; Kimble, KM; Follett, RF; Stewart, BA. eds. Soil processes and the carbon cycle. Estados Unidos, CRC Press. 1998. 1 – 8p.

## 2. PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cambio climático inducido por las actividades humanas es un problema mundial que afecta de forma negativa los procesos ecológicos, económicos y sociales que rigen el planeta, según Intergubernamental Panel on Climate Change<sup>7</sup>. El cambio climático es inducido principalmente por el aumento de gases de efecto invernadero como el metano, el óxido nitroso y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera.

En la actualidad los procesos relacionados con la captura del carbono en el suelo, constituyen áreas de investigación de gran relevancia, tanto a nivel nacional como internacional, debido al establecimiento del Protocolo de Kyoto, cuyo objetivo principal es reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global (dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), gas metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)) y tres gases industriales fluorados (Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>)). A su vez, este acuerdo internacional contempla los “*Bonos o créditos de carbono*”, para disminuir las emisiones contaminantes al medio ambiente y los costos de las actividades de reducción de emanaciones de gases de efecto invernadero, donde cada bono de carbono corresponde a una tonelada de dióxido de carbono equivalente (ton CO<sub>2</sub> eq.) que ha sido dejada de emitir a la atmósfera y cuyo valor aproximado según el Fondo Mexicano del Carbono (Fomecar) es de 15 dólares.

Esto porque según Ward et al.<sup>8</sup> cerca del 98% del carbono secuestrado en los ecosistemas de montaña se acumulan en el suelo. Rumpel & Kogel-Knabner<sup>9</sup> reconocen que la distribución de carbono orgánico en el suelo es el componente del ciclo del carbono más importante, pero aún es poco conocido.

Lorenz et al. estimaron que la profundidad del suelo tiene mayor potencial para secuestrar carbono de la atmósfera a través de materiales orgánicos presentes en el mismo. En ese sentido, aún no se estima de manera satisfactoria la cantidad de carbono orgánico en el suelo de ecosistemas montañosos, por lo que, Montes-

---

<sup>7</sup> INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Tercer informe de evaluación. Cambio Climático 2001. La base científica. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. OMM-PNUMA. 2001.

<sup>8</sup> WARD et al. Using carbon finance to support climate policy objectives in high mountain ecosystems. Climate Policy, 2015. 16(6), 1-20.

<sup>9</sup> RUMPEL, C. & KÖGEL-KNABNER, I. Deep soil organic matter a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. Plant Soil, 2011. 338(1-2), 143-158.

Montes et al.<sup>10</sup> consideran que se subestima el secuestro de carbono en suelos tropicales.

De la misma manera, no se conoce de la cantidad de las fracciones lábiles y estables de carbono orgánico presente en el suelo de las tres coberturas existentes en el páramo de La Cortadera, lo cual es un obstáculo para administrar proyectos de conservación de sumideros de carbono o para certificar e incluir este ecosistema como zona de secuestro de C, lo cual traería retribuciones y sería la base para vincular los ecosistemas de páramo del departamento de Boyacá.

## **2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cómo es la dinámica de las fracciones de carbono orgánico y cuáles son sus concentraciones en suelos del páramo La Cortadera?

---

<sup>10</sup> MONTES-PULIDO, C. et al. Estimation of soil organic carbon (SOC) at different soil depths and soil use in the Sumapaz paramo, Cundinamarca – Colombia. Acta Agronómica. 2017. 66(1): 95-101

### 3. JUSTIFICACIÓN

A pesar de que se conoce la capacidad que tienen los bosques y algunos sistemas silvopastoriles para almacenar carbono, aún falta información acerca del potencial de secuestro de carbono en suelo de ecosistemas de páramo. Los países no tienen contabilizado buena parte del carbono contenidos en sus ecosistemas naturales lo cual le impide administrar proyectos de conservación de sumideros de carbono. Rondón<sup>11</sup> afirma que no se posee un inventario ni siquiera aproximado de la cantidad de carbono total almacenado en los suelos de páramo, pero se estima que es notable.

Rondón<sup>12</sup> sugiere que los suelos de páramo han sido unos sumideros muy eficientes de carbono atmosférico, pero como resultado de la intervención antrópica, podrían devolver rápidamente sus reservas de nuevo a la atmósfera, contribuyendo al calentamiento global y creando un sistema de retroalimentación positiva en el que se acortaría el tiempo de vida de este ecosistema.

Este trabajo servirá como base para la realización de otros estudios en los diferentes páramos de nuestro departamento, con los que se busque fundamentos para la inclusión de estos, en proyectos de conservación como sumideros de carbono y así lograr retribuciones para Boyacá; adicionalmente es una contribución en la creación de una amplia base de datos que permita originar políticas, considerando la importancia de los suelos de páramo al actuar como albergue de carbono atmosférico.

---

<sup>11</sup> Ibid.

<sup>12</sup> RONDÓN, M. Los Páramos Andinos frente al calentamiento global. Historia de una sed anunciada. En: Revista Investigación y Ciencia. 2000. IX: 46-53.

## 4. ANTECEDENTES

### 4.1. CONTENIDO DE CARBONO EN SUELOS DE COLOMBIA

En los suelos de Colombia los contenidos de carbono orgánico más elevados se presentan en las partes altas de la cordillera de los Andes (Figura 1).

**Figura 1.** Contenido de carbono orgánico en suelos de Colombia



Fuente: IDEAM (2002)<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> IDEAM. 2002. Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en condición Hot Spot & Global Climatic Tensor. IDEAM – Colombia.



#### **4.1.1. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua**

Ibrahim et al.<sup>14</sup> realizaron un estudio con el fin de estimar el almacenamiento de Carbono orgánico en el suelo y la biomasa arbórea, en distintos usos de la tierra (pasturas degradadas, naturales y mejoradas con y sin árboles, bancos forrajeros, plantaciones forestales, bosques riparios y secundarios) en Colombia, Costa Rica y Nicaragua, concluyendo que el bosque secundario fue el uso de la tierra que presentó mayores cantidades del total de C en Costa Rica y Nicaragua, mientras que en Colombia fueron los bosques riparios. En los tres países las pasturas degradadas fueron el uso de la tierra que menos C total almacenó.

Los resultados mostraron que en cada uno de los paisajes ganaderos analizados las pasturas degradadas no están aportando significativamente al secuestro de carbono, mientras que las pasturas mejoradas con árboles y los sistemas silvopastoriles son usos de la tierra con mayores potenciales. El establecimiento de pasturas mejoradas con alta densidad de árboles presentó un alto potencial de secuestro de carbono, el cual se podría incrementar a nivel de finca y de paisaje insertando pequeñas áreas de plantaciones forestales y liberando otras áreas para dar paso a la regeneración natural del bosque.

#### **4.1.2. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos**

Carvajal et al.<sup>15</sup> estudiaron la relación de cambios en el uso del terreno con el C y N edáficos, en el municipio de Alcalá (región cafetera colombiana), entre 900 y 1600 m de elevación, además midieron contenidos de C y N, relación C:N, densidad aparente y abundancias de C y N. Concluyendo que la zona alta mostró mayores contenidos de C y N, mayor relación C:N, menor densidad aparente y abundancia de 15N. Barbechos y monocultivos almacenaron más carbono en la parte subterránea del suelo; mientras que en sitios más conservados los contenidos de C y N fueron bajos. El C según los usos, fluctuó entre -25,18 y -21,27‰ indicando que la mayoría del C fue fijado por plantas C<sub>3</sub>.

---

<sup>14</sup> IBRAHIM, M. et al. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* N° 45. 2007

<sup>15</sup> CARVAJAL, A. et al. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. En: *Revista en Ciencia del Suelo y Nutrición* 2009. 9(3): 222-235.

Además, se evidenció que los cambios en el uso afectan el almacenamiento de C, principalmente por prácticas como fertilización con productos de síntesis química; y que los suelos de Alcalá tienen alto potencial para la prestación de servicios ecosistémicos relacionados con la captura de carbono edáfico.

#### **4.1.3. Determinación de fracciones de carbono edáfico en un sistema pastoril bovino de la llanura deprimida salina de Tucumán, Argentina**

Banegas et al.<sup>16</sup> determinaron los contenidos de carbono orgánico total, carbono orgánico particulado, carbono orgánico pesado y carbono orgánico ligero en un Entisol, cultivado con *Chloris gayana* cv Finecut de la Llanura Deprimida Salina tucumana. El carbono orgánico ligero representó una porción importante del carbono orgánico total. Los valores medios de carbono orgánico particulado no presentaron diferencias significativas entre tratamientos, a excepción de la profundidad de 5 – 20 cm. El establecimiento de pasturas perennes aportó materia orgánica en los sistemas de manejo evaluados (pastoreo rotativo y confección de rollos). Las fracciones más importantes del carbono orgánico total fueron las más lábiles, asociadas a la macroagregación, evidenciando suelos poco desarrollados y ecosistemas de fragilidad importante, donde deben considerarse con mayor énfasis las prácticas sustentables de manejo.

#### **4.1.4. Distribución de fracciones de tamaños moleculares de ácidos húmicos y fúlvicos extraídos de andisoles**

Herrera et al.<sup>17</sup> se realizaron el análisis elemental y la distribución de tamaños moleculares de los ácidos húmicos (AH) y fúlvicos (AF) de los horizontes Ap y AB de dos perfiles de suelos clasificados como Typic Fulvudand (Marsella) y Acrudoxic Melanudand (Combia), procedentes del municipio de Marsella, departamento de Risaralda, Colombia. Los resultados de SEC (cromatografía de exclusión) permitieron comprobar las diferencias entre los horizontes Ap de los dos suelos en estudio acordes con su clasificación; así, en el suelo Combia Typic Melanudand, donde predominan los AH sobre los AF, se presenta un mayor porcentaje de ácidos húmicos con tamaños moleculares superiores a 80.000 Daltons, y en el suelo Marsella, clasificado como Acrudoxic Fulvudand, los AF predominan sobre los AH y presentan predominio de moléculas de menor tamaño (< 80.000).

---

<sup>16</sup> BANEGAS, N. et al. Determinación de fracciones de carbono edáfico en un sistema pastoril bovino de la Llanura Deprimida Salina de Tucumán, Argentina. Sitio Argentino de Producción Animal APPA - ALPA - Cusco, 2007. Perú.

<sup>17</sup> HERRERA, A. et al. Distribución de fracciones de tamaños moleculares de ácidos húmicos y fúlvicos. Revista Colombiana de Química, 2003. 32 (1).

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. OBJETIVO GENERAL**

Estimar la dinámica de liberación y las concentraciones de las fracciones de carbono orgánico en suelos del páramo La Cortadera, empleando técnicas analíticas y geoestadística.

### **5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Estimar los contenidos de carbono orgánico en sus diferentes fracciones, empleando el método de Walkley – Black.
- Comparar las concentraciones de carbono orgánico en suelo con tres coberturas vegetales diferentes y a dos profundidades
- Evaluar la dinámica de las fracciones de carbono al retirar la cobertura vegetal, en los tres tipos de uso de suelo.
- Cuantificar las toneladas por hectárea de carbono secuestrable en las fracciones presentes en los suelos del ecosistema del páramo La Cortadera.
- Establecer tendencias espaciales del contenido de carbono orgánico a través de herramientas de sistemas de información geográfica.

## 6. MARCO TEÓRICO

### 6.1. ECOSISTEMAS DE PÁRAMOS

#### 6.1.1. Generalidades

De acuerdo con Rangel<sup>18</sup> “la región de vida paramuna comprende las extensas zonas que coronan las cordilleras entre el bosque andino y el límite inferior de las nieves perpetuas, donde interaccionan el suelo, el clima, la biota y la influencia humana”.

Los páramos de Colombia se asimilan a áreas altas, frías, húmedas, nubladas y con vegetación abierta hasta arbustiva, dentro de la que se destacan los emblemáticos frailejones según, Morales et al.<sup>19</sup>; además están ubicados por encima del límite superior del bosque cerrado, o bosque de niebla, y por debajo del límite superior de vida en las montañas tropicales de centro y sur América, como lo comenta Hofstede<sup>20</sup> en su investigación. Sklenár et al.<sup>21</sup> reportan que este ecosistema presenta una gran biodiversidad y endemismo, pero desde el punto de vista ecológico es un ambiente frágil. Según el Ministerio del Medio Ambiente<sup>22</sup> en Colombia, el área aproximada de páramos es de 14.000 km<sup>2</sup>, equivale al 1.3% del territorio nacional. Los departamentos colombianos con mayor representatividad de páramos son en su orden Boyacá (18.3%), Cundinamarca (13.3%), Santander (9.4%), Cauca (8.1%), Tolima (7.9%) y Nariño (7.5%).

En estas franjas de alta montaña es donde nacen la mayoría de los ríos y quebradas que surten de agua los acueductos municipales de una buena parte de localidades andinas del país; estos ecosistemas poseen características ecológicas muy particulares que, sumadas a su historia geológica reciente, las convierten en zonas de interés nacional según Rangel<sup>23</sup>.

---

<sup>18</sup> RANGEL, J. Colombia, diversidad biótica III: La región de vida paramuna. Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Naturales- Universidad Nacional de Colombia e Instituto Humboldt. 2000. Bogotá, D.

<sup>19</sup> MORALES et al. Op. Cit.

<sup>20</sup> HOFSTEDE. Op. Cit.

<sup>21</sup> SKLENÁR P. et al. Flora genérica de los páramos. Guía ilustrada de plantas vasculares. The New York Botanical Garden Press. 2005. 503p.

<sup>22</sup> MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Programa para el Manejo Sostenible y Restauración de Ecosistemas de Alta Montaña: Páramos. 2001.

<sup>23</sup> RANGEL, J. Colombia Diversidad Biótica V. La alta montaña de la Serranía de Perijá. Instituto de Ciencias Naturales-CORPOCESAR. 2007. Bogotá. 472p

Según Díaz et al.<sup>24</sup> el límite inferior de los páramos es variable según la latitud, la vertiente, el clima global y la actividad humana. La zonificación típica utilizada en la alta montaña colombiana corresponde a bosque alto andino (3000 a 3200 msnm), páramo bajo o subpáramo (entre 3200 y 3500 o 3600 msnm), páramo propiamente dicho (entre 3500 o 3600 y 4100 msnm) y superpáramo (entre 4100 y 4500 msnm).

### 6.1.2 Clima

El clima en la región paramuna es muy variado, no sólo en cuanto a la distribución de la precipitación pluvial se refiere, sino en relación con las variaciones de temperatura, la luminosidad, la duración del día de luz, la incidencia de la energía ultravioleta, la humedad relativa y los vientos.

La cantidad de agua que recibe el suelo en forma de lluvia oscila, en general, desde algo menos de 600 mm hasta más de 3.000 mm y se distribuye en regímenes bimodales y tetramodales, aunque se reporta para El Cardón, a 3.590 m.s.n.m. en la cordillera Oriental, un patrón unimodal de la precipitación según Rangel *et al.*<sup>25</sup>

Ospina & Rodríguez<sup>26</sup> reportan que la temperatura promedio anual es inferior a 10°C en los sectores por debajo de los 3600 m.s.n.m. y a 8°C en aquéllos por encima de esa altitud. Los páramos presentan condiciones ambientales extremas debido a su baja temperatura media diaria, alto promedio diario de humedad relativa, baja presión atmosférica, escasa densidad del aire, alta radiación solar, cambios intradiurnos bruscos de temperatura y humedad, y suelos ácidos. Las características climáticas varían dependiendo de la posición geográfica.

### 6.1.3 Vegetación

La vegetación en el páramo ha desarrollado características fisiológicas para adaptarse y sobrevivir a las extremas condiciones del clima, topografía y suelos. Algunas de estas características son la formación de rosetas que sirve de defensa contra viento y frío, la enanificación arbustiva, el desarrollo de hojas coriáceas que

---

<sup>24</sup> DÍAZ, M. et al. Páramos: Hidrosistemas Sensibles. En: Revista de Ingeniería. Noviembre 2005, No. 22, Facultad de Ingeniería, 2005. Universidad de los Andes.

<sup>25</sup> RANGEL, J. et al. Colombia, diversidad biótica II: Tipos de vegetación en Colombia. Editorial Guadalupe Ltda., 1997. Bogotá. p. 436

<sup>26</sup> OSPINA, D. & RODRIGUEZ, C. Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia. Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial e Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander Von Humboldt. Alianza Ediprint Ltda. – Guerra Editores. 2011. Bogotá: 68p.

reduce la pérdida de agua por transpiración, la formación de cubiertas de pelos en las hojas para captar el agua de lluvia o de rocío, la permanencia de hojas muertas sobre los tallos (mantiene la temperatura, atrapa residuos orgánicos, almacena agua), la formación de macollas (trampa de materia orgánica y de humedad) y la agrupación de varias plantas pequeñas en cojines, entre otros, según Salamanca<sup>27</sup>.

La vegetación como factor activo de formación de suelos de páramo es muy variada y particular. Rangel et al. (1997) anota que los tipos más frecuentes son los matorrales representados por especies de *Hypericum laricifolium*, *Pentacalia vernicosa*, *Ageratina tinifolia* y *Loricaria colombiana*; los cuales se establecen desde el páramo bajo hasta el superpáramo. Los pastizales aparecen desde el páramo hasta el superpáramo, destacándose *Calamagrostis effusa* y *Agrostis tolucensis*, en la cordillera Oriental. Los frailejones han sido registrados desde el subpáramo hasta los límites del superpáramo con las nieves perpetuas; en la cordillera Oriental hay una gama de comunidades, siendo las más frecuentes *Espeletia grandifolia*, *Espeletia lópezzii* y *Espeletia phaneracthys*. Los prados incluyen los cojines o colchones de plantas que crecen sobre cubetas, lagunas y lagunetas, como *Azorella crenata*, *Distichia muscoides* y *Werneria humilis*.

#### 6.1.4 Edafofauna

Al tratar el tema de los organismos como factor formador de los suelos, no puede dejar de mencionarse la edafofauna, en sus niveles micro, meso y macro, de la cual se conoce muy poco en el caso de los suelos de páramos. Los estudios de Chamorro<sup>28</sup> señalan que la mayor población se registra en los horizontes O; los taxa principales y típicos de los suelos de alta montaña son Enchytreidae, Lumbricidae, Collembola, Coleóptera, Díptera y Arácnida.

Malagón<sup>29</sup> reporta que los organismos del suelo no sólo son parte esencial de él, sino que juegan un papel fundamental en su formación. Sin duda los procesos más importantes durante la edafogénesis son la captura de energía y sustancias a través de la fotosíntesis, el proceso contrario o sea la descomposición de la hojarasca, el intercambio de nutrientes y la formación de complejos orgánico-minerales.

---

<sup>27</sup> SALAMANCA, S. "La vegetación del Páramo, Única en el Mundo". En: Colombia, sus Gentes y Regiones. 1986. Vol 2.

<sup>28</sup> CHAMORRO, C. Efecto del uso del suelo sobre la composición edofaunística de los páramos que circundan la ciudad de Bogotá. En: Suelos Ecuatoriales. 1989. XIX (1): 48-62.

<sup>29</sup> MALAGON, D. Ensayo sobre topología de suelos colombianos – Énfasis en génesis y aspectos ambientales. En: Rev. Acad. Colombia Científica. 2003. 27 (104): 319-341.

El reordenamiento de los materiales del suelo por plantas y animales, la absorción de nutrientes por la biota, la respiración, la fijación de nitrógeno, la acción de las micorrizas en la captura de nutrientes, etc. son otras de las acciones ejecutadas por los organismos del suelo que repercuten en su morfología, en las propiedades físicas y en las concentraciones de sustancias orgánicas y de nutrientes, de acuerdo con lo descrito por Malagón<sup>30</sup>.

### 6.1.5 Relieve

El relieve montañoso contribuye notablemente en la génesis, la evolución y la distribución espacial de los suelos de páramos; además es un elemento condicionante y determinante de la circulación de los vientos, las variaciones de calor, los niveles de condensación, la distribución de las lluvias, la circulación de la energía y el flujo de agua, lo cual afecta la naturaleza de los suelos. Adicionalmente, las formas de la tierra, el tipo de modelado del relieve y las clases de pendiente determinan el drenaje, la profundidad efectiva y el grado de evolución de los suelos, según Malagón<sup>31</sup>.

El Instituto Ecuatoriano Forestal de Áreas Naturales y Vida Silvestre & Global Environment Facility<sup>32</sup> y Hofstede<sup>33</sup> reportan que generalmente los suelos del páramo tienen una capa orgánica relativamente profunda, son muy ácidos con un alto nivel de saturación de agua y retención de humedad aún en períodos de baja precipitación, por lo que la capacidad de retención de agua del suelo es mucho más alta que la de la vegetación

Los suelos de páramo son, por lo general, de origen volcánico y se caracterizan por ser húmedos y ácidos, con pH entre 3.9 y 5.4, son ricos en humus bien descompuesto, enmohecido y de color pardo oscuro o negro; con un espesor que varía entre algunos centímetros y un metro según Malagón<sup>34</sup>. En el páramo, Hofstede y Sevink<sup>35</sup>, encontraron que la descomposición de la materia orgánica se lleva a cabo a tasas muy bajas, debido a las bajas temperaturas y a la alta humedad.

---

<sup>30</sup> Ibid.

<sup>31</sup> Ibid.

<sup>32</sup> INSTITUTO ECUATORIANO FORESTAL DE ÁREAS NATURALES Y VIDA SILVESTRE & GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY. Guía para los Páramos del Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador. 1996

<sup>33</sup> HOFSTEDE, R. "La importancia Hídrica del Páramo y aspectos de su manejo". 1er Paramo Electronic Forum, 1997. CONDESAN.

<sup>34</sup> MALAGON, D. Ensayo sobre topología de suelos colombianos – Énfasis en génesis y aspectos ambientales. En: Revista Académica Colombia Cien. 2003. 27(104): 319-341.

<sup>35</sup> HOFSTEDE, R. & SEVINK, J. Effects of Burning and Grazing on a Colombian Param Ecosystem. Ámsterdam, Tesis de PhD. Universitet van Ámsterdam, 1995. 198 p.

Asimismo, Malagón<sup>36</sup> describe que la infiltración es generalmente alta debido a la presencia de suelos típicamente porosos relacionados con altos valores de conductividad hidráulica. La retención de agua es especialmente significativa, dado que en los primeros 30 cm de profundidad el agua ocupa el 61.7% del volumen total del suelo. Así, los suelos de páramo se caracterizan por tener altas porosidades y altas conductividades hidráulicas.

#### **6.1.5 Regulación hídrica**

De acuerdo con el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria<sup>37</sup> la conjunción del clima de páramo y las características de vegetación y suelos hace que los hidrosistemas de éstos constituyan unos reguladores naturales de la escorrentía. Algunos autores les denominan las fábricas de agua. Otros le asocian el efecto de esponja a la regulación hídrica, mostrando su importancia en los flujos en épocas de estiaje. Efectivamente, en Colombia los páramos regulan el 70% de los ríos en sus cabeceras, aportan el 4% de la oferta hídrica superficial colombiana y abastecen de agua a los municipios.

#### **6.1.6 Importancia de los páramos**

Además de su alta diversidad de especies y hábitats, los páramos prestan importantes servicios ecosistémicos que son fundamentales para el bienestar de todos los colombianos. En este sentido, los páramos son pieza clave en la regulación del ciclo hídrico (en estos ecosistemas nacen las principales estrellas fluviales del país, las cuales abastecen de agua a más del 70% de los colombianos), almacenan y capturan gas carbónico de la atmósfera, contribuyen en la regulación del clima regional, son hábitat de especies polinizadoras y dispersoras de semillas y son sitios sagrados para la mayoría de culturas ancestrales, entre muchos otros beneficios según Hofstede & Sevink<sup>38</sup>

A pesar de la notable importancia de estos ecosistemas, desde hace décadas se registran altos índices de poblamiento y ocupación de los páramos, expresados en profundas transformaciones ecosistémicas originados en procesos productivos como la agricultura, la ganadería y en algunos casos la minería. Estas transformaciones han estado acompañadas por el aumento en la contaminación, la invasión biológica, la vulnerabilidad de estos ecosistemas al cambio climático, las

---

<sup>36</sup> MALAGÓN. Op. Cit.

<sup>37</sup> CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA, 2005.

<sup>38</sup> HOFSTEDE & SEVINK. Op. Cit.



alteraciones en los límites naturales de estos ecosistemas, la pérdida de hábitats y especies, y la disminución en la capacidad de prestar servicios ecosistémicos, lo que genera dificultades en el desarrollo de actividades de manejo y conservación, según Ospina & Rodríguez<sup>39</sup>.

Así mismo, Rondón<sup>40</sup> afirma que si la cobertura vegetal del páramo desaparece por cualquier causa, la superficie quedaría expuesta a la acción directa del sol que propiciaría la desecación del suelo, cambiando su estructura y permitiendo que la materia orgánica se descomponga más rápidamente. Además, el color negro de los suelos del páramo debido a la alta concentración de compuestos húmicos favorecería la absorción de la radiación solar, generando un aumento en la temperatura del suelo que unida al aumento de la temperatura del ambiente, aceleraría los procesos microbiológicos de descomposición, produciendo la oxidación de la materia orgánica y liberación de grandes cantidades de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

## **6.2. CAMBIO CLIMÁTICO**

La Comunidad Andina de Naciones<sup>41</sup> reporta que el cambio climático está atribuido directa o indirectamente a la acción del hombre a través de la quema de combustibles fósiles, la deforestación, los incendios forestales, entre otras actividades que producen gases efecto invernadero, los mismos que han ocasionado el mayor incremento de temperatura del planeta en los últimos años, aumentando de 0,6 y 0,9°C entre 1906 y 2006, lo que ha alterado la composición de la atmósfera mundial, la variabilidad climática natural, el incremento promedio de la temperatura del aire y de los océanos, el derretimiento de los glaciares en un 2,7 % en el ártico y la elevación del nivel del mar de 17 cm durante este siglo, según la Comunidad Andina de Naciones<sup>42</sup>.

### **6.2.1. Causas del cambio climático**

La acumulación de gases efecto invernadero, según la Comunidad Andina de Naciones<sup>43</sup>, en la atmósfera es una de las principales causas del actual cambio

---

<sup>39</sup> OSPINA, D. & RODRIGUEZ, C. Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia. Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial e Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander Von Humboldt. Alianza Ediprint Ltda. – Guerra Editores. 2011. Bogotá: 68p.

<sup>40</sup> RONDÓN, M. Op. Cit.

<sup>41</sup> COMUNIDAD ANDINA DE NACIONES, 2007. Clima Latino. Disponible en: [www.comunidadandina.org](http://www.comunidadandina.org).

<sup>42</sup> COMUNIDAD ANDINA DE NACIONES, 2008. Impacto del Cambio Climático en la Comunidad Andina disponible en: [www.comunidadandina.org](http://www.comunidadandina.org).

<sup>43</sup> COMUNIDAD ANDINA DE NACIONES. Op. Cit.

climático, estos gases (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, HFCs, PFCs, SF<sub>6</sub>) atrapan la radiación solar de onda larga causando un efecto de calentamiento gradual alrededor de la Tierra (Intergubernamental Panel on Climate Change, 2007); una vez que éstos llegan a la atmósfera no desaparecen, sino que permanecen allí durante décadas.

Medina et al.<sup>44</sup> reportan que otra de las causas es el cambio de uso de la tierra, principalmente la deforestación para ganadería o agricultura. Cada año una superficie de 16 millones de hectáreas es deforestada, emitiendo 1,8 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

### **6.2.2. Efectos del cambio climático**

Los efectos del cambio climático están reflejados principalmente en la alteración del clima sobre todo en la precipitación y temperatura, ocasionando frecuentes inundaciones que afectarán gravemente al 60 % de la población mundial que vive cerca de las costas, descrito por Intergubernamental Panel on Climate Change<sup>45</sup>. Así mismo, en el Programa de las Naciones Unidas<sup>46</sup> para el medio ambiente se describe que el cambio climático ejerce presión sobre la fauna y la flora, en especial en ecosistemas con climas particulares.

Por otro lado, la Comunidad Andina de Naciones<sup>47</sup> resalta que los glaciares también se ven afectados por el cambio climático, mediciones satelitales revelan que los glaciares a nivel mundial están desapareciendo; el retroceso glaciar y la disminución de la disponibilidad de agua también es una preocupación de los pueblos andinos donde ya se empieza a evidenciar la alteración de los mismos, esto tendrá un efecto dramático en la región tanto para el acceso a fuentes de agua, hidroenergía y agricultura, como para la conservación de los ecosistemas naturales.

### **6.2.3. La biodiversidad y el cambio climático**

Con frecuencia plantas y animales no toleran el calor y emigran hacia otros climas. Las especies que no pueden migrar enfrentan el mayor peligro de extinción. Se

---

<sup>44</sup> MEDINA, G. et al. El Páramo como espacio de mitigación de carbono atmosférico. Serie Páramo 1. GTP/Abya Yala. 1999. Quito.

<sup>45</sup> INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. Disponible en: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).

<sup>46</sup> PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE. Informe anual del PNUMA – 2007.

<sup>47</sup> COMUNIDAD ANDINA DE NACIONES. Op. Cit.

estima que si las temperaturas suben 1,5 o 2,5°C, el 20 o 30 % de las especies de plantas y animales estarán en riesgo de extinción, además de que se provocará cambios en su distribución según la Comunidad Andina de Naciones<sup>48</sup>. Por otra parte, Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente<sup>49</sup> reporta que los bosques podrían verse amenazados cada vez más por las plagas y los incendios, volviéndose más vulnerables a las especies invasoras.

#### **6.2.4. Efectos del cambio climático sobre el páramo**

Los resultados de estudios realizados por el IDEAM indican que en un escenario de duplicación de CO<sub>2</sub>, la temperatura aumentará entre 2.5 y 3°C y la precipitación se reducirá entre un 10 y 20%. El principal efecto potencial es el probable ascenso de las zonas bioclimáticas y sus límites hasta de unos 400 a 500 m, en un tiempo relativamente corto, como lo evidencian el Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales<sup>50</sup>, Ministerio del Medio Ambiente y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

La adaptación de las especies al cambio climático dependerá no solo de su variabilidad genética, sino de su capacidad de migración y dispersión favoreciéndose aquellas especies con altas tasas de propagación y colonización a distancia. Por otro lado, los ecosistemas no responderían de una forma única al cambio climático, sino que cada especie responderá de manera diferente. Las asociaciones actuales entre las especies se pueden romper, y nuevas comunidades o formas de combinaciones de especies aparecerán. Tampoco todas las especies poseen la misma vulnerabilidad ante el cambio climático, algunas incluso se verían beneficiadas, dado que los mayores niveles de CO<sub>2</sub> podrían estimular la fotosíntesis en ciertas plantas; como es el caso de las plantas C3, que suprimen su fotorrespiración y hacen más eficientemente el metabolismo del agua a medida que se aumentan las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico. Dado que la gran mayoría de las plantas son tipo C3, se podría pensar que el cambio climático favorecerá la competitividad de estas especies sobre las C4, mientras que éstas se podrían ver muy afectadas según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales<sup>51</sup>, Ministerio del Medio Ambiente<sup>52</sup> y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo<sup>53</sup>.

---

<sup>48</sup> Ibid.

<sup>49</sup> PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE. Op. Cit.

<sup>50</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Op. Cit.

<sup>51</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Op. Cit.

<sup>52</sup> MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. Op. Cit.

<sup>53</sup> PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO. Op. Cit.

### 6.2.5. Convenios internacionales relacionados con el cambio climático

En 1997 se estableció el “protocolo de Kyoto sobre el Cambio climático, el cual promueve un “desarrollo sostenible” y cuyo objetivo principal es disminuir el cambio climático antropogénico y reducir las emisiones de los seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) fue adoptada en 1992, el cual permitió reforzar la conciencia pública, a escala mundial, de los problemas relacionados con el cambio climático y lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático y en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurando que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitiendo que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.

Dichos convenios establecieron las bases de un mercado de reducción de emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) y crearon el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) para reducir el costo de reducción de emisiones asumido por los países industrializados y promover el desarrollo sostenible de países en vía de desarrollo. El MDL permite que los países industrializados inviertan en proyectos en los países en desarrollo. Se estima que alrededor de \$7500 millones de dólares se generaran como parte de dichas inversiones como lo reportan el Ministerio del Medio Ambiente & el Banco Mundial<sup>54</sup>.

Recientemente el MDL introdujo un nuevo acuerdo denominado Flexibilidad, que consiste en la instauración del comercio de emisiones, con el fin de ayudar a los países desarrollados a cumplir sus compromisos de reducción de emisiones, el cual funciona a través de tres vías, según ASOCARS<sup>55</sup>:

- El comercio de emisiones entre los 38 países desarrollados que acordaron una cantidad permitida de emisiones durante el periodo 2008 al 2012. En caso de que un país emita menos de lo autorizado podrá vender la diferencia

---

<sup>54</sup> MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE Y BANCO MUNDIAL. Estudio de estrategia nacional para la implementación del MDL en Colombia. Informe final. Abril de 2000. Bogotá, Colombia.

<sup>55</sup> ASOCARS. Cumbre mundial sobre desarrollo sostenible. Recopilación de materiales relevantes para el proceso preparatorio de Río. 2002. El conversatorio Año 1 No. 1: Bogotá, Colombia.

a otro país. Se busca con esto mantener el objetivo global de reducción del 5.2% de las emisiones de gases de efecto invernadero.

- El comercio de unidades de reducción de emisiones obtenidas en proyectos concretos entre países.
- La implementación conjunta entre países desarrollados y el MDL que opera entre países desarrollados y en vía de desarrollo.

El MDL considera tres tipos de proyectos: los que reducen emisiones en la fuente, los que capturan carbono en los sumideros y los mixtos en la Oficina Argentina del Mecanismo para un Desarrollo Limpio, Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable<sup>56</sup>.

Actualmente, las negociaciones internacionales sobre cambio climático, únicamente han tenido en cuenta los proyectos de forestación y reforestación, mientras que los proyectos de conservación de sumideros no han sido considerados; lo cual puede afectar la participación de Colombia en los mercados internacionales de reducción de emisiones, reportado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial<sup>57</sup>.

### **6.3. CARBONO ORGÁNICO**

#### **6.3.1. Ciclo de carbono**

El ciclo del carbono comienza con la fijación del dióxido de carbono atmosférico a través de los procesos de fotosíntesis realizada por las plantas y ciertos microorganismos.

En este proceso, el dióxido de carbono y el agua reaccionan para formar carbohidratos y simultáneamente liberar oxígeno, que pasa a la atmósfera. Parte de los carbohidratos se consumen directamente para suministrar energía a la planta, y el anhídrido carbónico, así formado, se libera a través de sus hojas o de sus raíces. Otra parte es consumida por los animales, que también liberan dióxido de carbono en sus procesos metabólicos. Tal como se observa en la Figura 2, las plantas y los animales muertos son finalmente descompuestos por microorganismos del suelo, lo

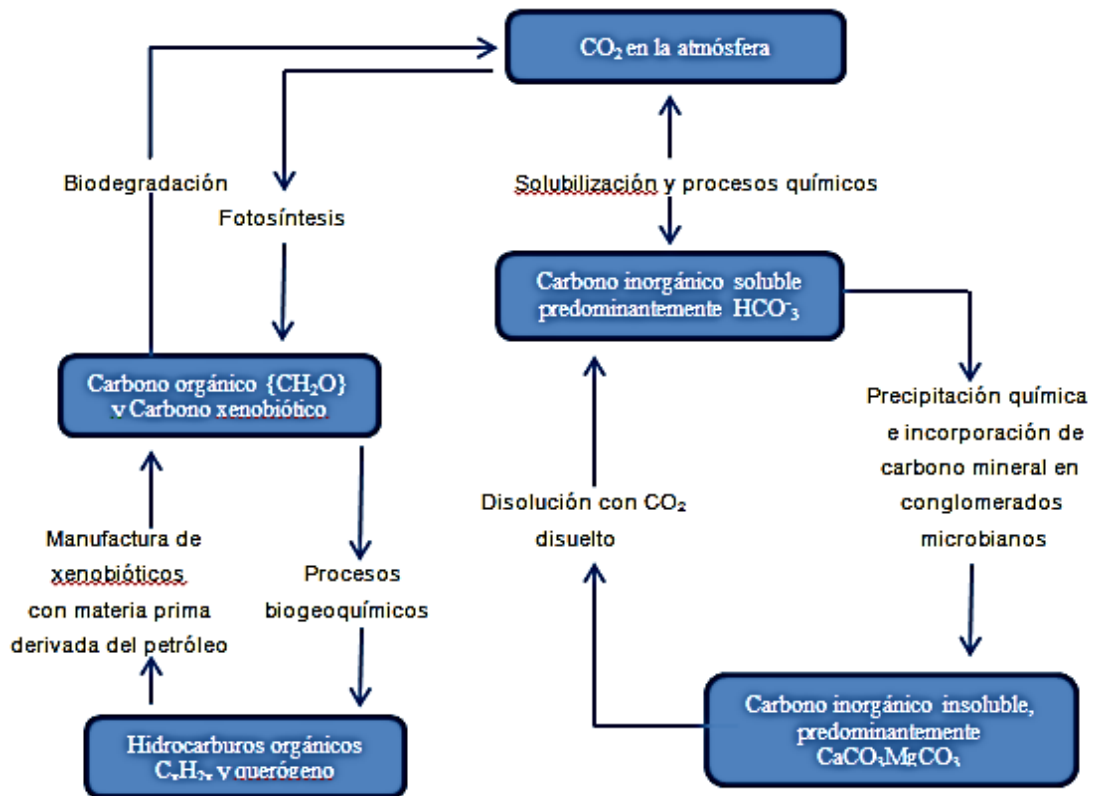
---

<sup>56</sup> OFICINA ARGENTINA DEL MECANISMO PARA UN DESARROLLO LIMPIO, SECRETARIA DE AMBIENTE Y DESARROLLO USTENTABLE. Proyectos forestales en el MDL. 2003

<sup>57</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO TERRITORIAL. Sin publicar.

que da como resultado que el carbono de sus tejidos se oxide en anhídrido carbónico y regrese a la atmósfera, tal y como lo describen Orellana et al.<sup>58</sup>

**Figura 2. Ciclo del carbono**



Fuente: Manahan (2007)<sup>59</sup>

El carbono mineral, describe Manahan<sup>60</sup> se mantiene en un depósito de calcita, CaCO<sub>3</sub>, del que puede lixiviarse a una disolución mineral en forma de ión bicarbonato disuelto HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, que se forma cuando el CO<sub>2</sub> (acuoso) disuelto reacciona con el CaCO<sub>3</sub>. En la atmósfera el carbono está presente como dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>. El dióxido de carbono atmosférico es fijado como materia orgánica (representada por la fórmula general {CH<sub>2</sub>O}) por la fotosíntesis y el carbono orgánico se libera como CO<sub>2</sub>, por la descomposición microbiana de la materia orgánica.

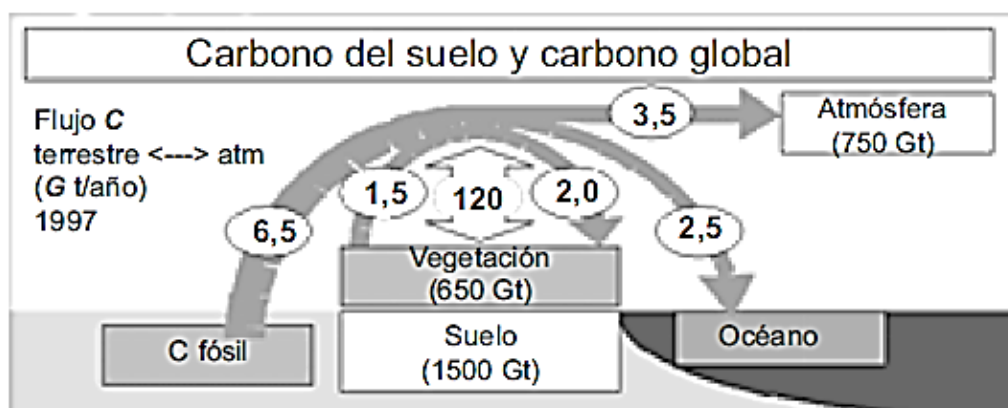
<sup>58</sup> ORELLANA, G. et al. Descripción de la dinámica de carbono en suelos forestales mediante un modelo de reservorios. En: Avances en Ciencias e Ingeniería. Enero - marzo, 2012. 3(1): 123-135.

<sup>59</sup> MANAHAN, S. Introducción a la química ambiental. México: Universidad Autónoma.: Editorial Reverté, 2007. p. 725.

### 6.3.2. Carbono en el suelo

El ciclo terrestre del carbono se presenta en la Figura 3. En este ciclo el carbono orgánico del suelo representa la mayor reserva en interacción con la atmósfera y se estima en cerca de 1500 Pg. Ca 1m de profundidad (cerca de 2456 a 2 m de profundidad). El carbono inorgánico representa cerca de 1700 Pg. pero es capturado en formas más estables tales como carbonato de calcio. La vegetación (650 Pg.) y la atmósfera (750 Pg.) almacenan considerablemente menos cantidades que los suelos. Los flujos entre el carbono orgánico del suelo terrestre y la atmósfera son importantes y pueden ser positivos bajo la forma de captura o negativos como emisión de CO<sub>2</sub>.

**Figura 3.** El ciclo terrestre del carbono: el carbono del suelo y el carbono global disponible.



Fuente: International Geosphere Biosphere Program (1998). Citado en: Robert, (2000)<sup>61</sup>.

El C orgánico del suelo se encuentra en forma de residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos, en forma de humus y en formas muy condensadas de composición próxima al C elemental, según Jackson (1964) citado por Martínez et al.<sup>62</sup> En condiciones naturales, el C orgánico del suelo resulta del balance entre la incorporación al suelo del material orgánico fresco y la salida de C del suelo en forma de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, erosión y lixiviación como lo reporta Aguilera<sup>63</sup>.

<sup>61</sup> ROBERT, M. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. 2000. Roma. 73 p.

<sup>62</sup> MARTÍNEZ, E. et al. Carbono Orgánico y Propiedades del Suelo. En: R. C. Suelo Nutr. Veg., 2008. 8(1): 68-96.

<sup>63</sup> AGUILERA, S. Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. En: Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo. Boletín 2000. N° 14. Valdivia, Chile. p. 77-85.

La FAO (citada por Martínez et al.<sup>64</sup>) asegura que cuando los suelos tienen condiciones aeróbicas, una parte importante del carbono que ingresa al suelo (55 Pg. C año<sup>-1</sup> a nivel global) es lábil y se mineraliza rápidamente y una pequeña fracción se acumula como humus estable (0,4 Pg. C año<sup>-1</sup>). El CO<sub>2</sub> emitido desde el suelo a la atmósfera no solo se produce por la mineralización de la MOS donde participa la fauna edáfica (organismos detritívoros) y los microorganismos del suelo, sino también se genera por el metabolismo de las raíces de las plantas.

Aguilera<sup>65</sup> describe que el carbono orgánico es esencial para la actividad biológica del suelo. Además, según Borie et al. (citado por Martínez et al.<sup>66</sup>) proporciona recursos energéticos a los organismos del suelo, mayoritariamente heterótrofos, en forma de carbono lábil (hidratos de carbono o compuestos orgánicos de bajo peso molecular).

La FAO<sup>67</sup> reporta que el carbono orgánico del suelo es un componente importante del ciclo global del carbono, ocupando un 69,8 % del C orgánico de la biosfera. El suelo puede actuar como fuente o reservorio de carbono dependiendo de su uso y manejo, como lo describe Lal et al.<sup>68</sup> Reiscoy<sup>69</sup> estima que desde que se incorporan nuevos suelos a la agricultura hasta establecer sistemas intensivos de cultivo se producen pérdidas de COS que fluctúan entre 30 y 50% del nivel inicial. La pérdida de material húmico de los suelos cultivados es superior a la tasa de formación de humus de suelos no perturbados por lo que el suelo, bajo condiciones de cultivo convencionales, es una fuente de CO<sub>2</sub> para la atmósfera.

El carbono orgánico del suelo afecta la mayoría de las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo vinculadas con su: calidad, sustentabilidad, como lo describe Carter<sup>70</sup> y capacidad productiva, dicho por Sánchez et al.<sup>71</sup> por lo que, en un manejo sustentable, el carbono orgánico del suelo debe mantenerse o aumentarse.

---

<sup>64</sup> Ibid.

<sup>65</sup> AGUILERA, S. Op. Cit.

<sup>66</sup> Ibid.

<sup>67</sup> FAO. Soil carbon sequestration for improved land management. World soil reports 96. 2001. Rome, 58 p.

<sup>68</sup> LAL, R. et al. Conservation tillage in sustainable agriculture. In: C. A. Edwards, R. Lal, P. Madden, R. H. Miller and G. House, Sustainable Agriculture Systems. Soil and Water Conservation Society, 1999. Iowa, USA, pp. 203-225.

<sup>69</sup> REICOSKY, D. Long – Term Effect of Moldboard Plowing on Tillage –Induced CO<sub>2</sub> Loss, in J. M. Kimble, R. Lal and R. F. Follet: Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil. Lewis Publishers. Papers from symposium held July 1999 at Ohio State University, Columbus, 2002. Ohio, 87-96 p.

<sup>70</sup> CARTER, M. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. Agron. Journal, 2002. 94, 38-47.

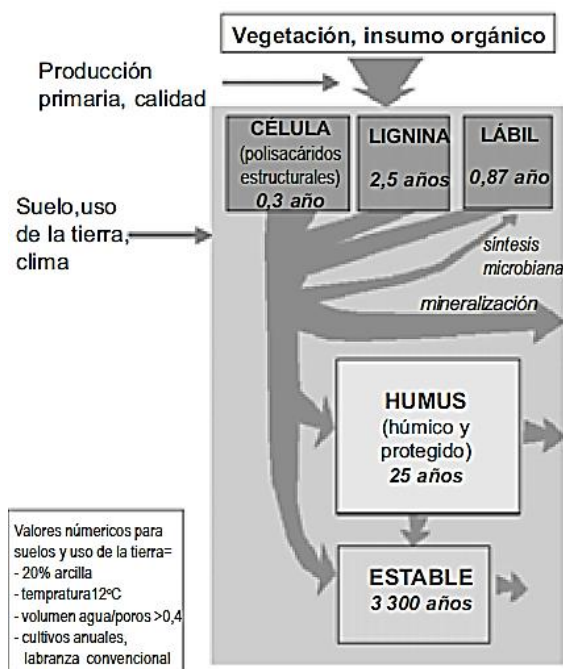
<sup>71</sup> SÁNCHEZ, J. et al. Managing soil carbon and nitrogen for productivity and environmental quality. Agron. Journal, 2004. 96, 769-775.



### 6.3.3. Dinámica del carbono orgánico en los suelos

Las existencias de carbono orgánico presente en los suelos naturales representan un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición (mineralización) Figura 3.

**Figura 3.** Modelo de la dinámica del carbono en el suelo.



Fuente: Balesdent et al. (2000)<sup>72</sup>.

En condiciones aeróbicas del suelo, gran parte del carbono que ingresa al mismo es lábil y solo una pequeña fracción (1%) del que ingresa se acumula en la fracción húmica estable. La biomasa microbiana representa de uno a cinco por ciento del total de la materia orgánica del suelo y es una fuente de reserva de nutrientes (N, P).

### 6.3.4. Materia orgánica del suelo

Se conoce como materia orgánica del suelo (MOS) a un conjunto de residuos orgánicos de origen animal y/o vegetal que están en diferentes etapas de

<sup>72</sup> BALESDENT, J.; ARROUAYS, D. & GAILLARD, J. Morgane: un modèle de simulation des réserves organiques des sols et de la dynamique du carbone des sols. Submitted to Agronomie. 2000

descomposición, y que se acumulan tanto en la superficie como dentro del perfil del suelo, como lo reporta Rosell (citado por Martínez et al.)<sup>73</sup> Además, incluye una fracción viva, o biota, que participa en la descomposición y transformación de los residuos orgánicos.

Fassbender & Bornemisza (citados por Márquez & Cely)<sup>74</sup> afirman que la composición química de la materia orgánica es muy heterogénea, pues la cantidad de compuestos químicos que se presentan es infinita. Los restos vegetales y animales son polímeros de compuestos orgánicos que durante el proceso de su transformación son degradados y despolimerizados hasta sus constituyentes básicos, produciéndose inorgánicos y orgánicos. A través del proceso de humificación subsiguiente, y por medio de síntesis microbiológicas, se producen nuevos componentes, generalmente de coloración oscura y con alto grado de polimerización, éstos son los que constituyen la fracción denominada edáfica, por ser propia de los procesos de reorganización ocurridos en el suelo.

Aguilera<sup>75</sup> comenta que en la materia orgánica del suelo se distingue una fracción lábil, disponible como fuente energética, que mantiene las características químicas de su material de origen (hidratos de carbono, ligninas, proteínas, taninos, ácidos grasos), y una fracción húmica, más estable, constituida por ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas.

- **Ácidos fúlvicos:** Son compuestos de alta acidez (entre 900 y 1400 meq/100g), bajo grado de polimerización, extraíbles por álcalis y no precipitable en ácido, tienen un color rojo amarillento. Generalmente son compuestos fenólicos de pequeño peso molecular.

Comprenden los formados de todas las sustancias orgánicas de la solución ácida que quedan después de precipitar el ácido húmico de la sustancia húmica. Tienen los mismos grupos funcionales de los ácidos húmicos, poseen una alta capacidad de intercambio catiónico, tienen una alta capacidad de disolver minerales y pueden formar complejos con los cationes metálicos de los minerales que disuelven, como lo reportan Zapata & Osorio (citados por Márquez & Cely<sup>76</sup>).

---

<sup>73</sup> Ibid.

<sup>74</sup> MARQUEZ & CELY. El páramo y su potencial de captura de carbono; experiencia páramo La Cortadera-Boyacá. Memorias Congreso de investigación y pedagogía III nacional y II internacional. 2013.

<sup>75</sup> AGUILERA, S. Op. Cit.

<sup>76</sup> Ibid.

- **Ácidos húmicos:** son compuestos de alto peso molecular, baja acidez (entre 500 y 870 meq/100g), generalmente son polímeros de alto grado; su carácter ácido, o sea su capacidad de intercambio catiónico, se basa principalmente en la presencia de radicales COOH y OH. Estos compuestos son de color oscuro, y solubles en álcali, pero Precipitan en medio ácido; presentan una fracción soluble en etanol, que se conoce como ácidos himatomelánicos, la cual es de color marrón rojiza.

Físicamente son coloides esféricos, tendientes a unirse en cadenas, formando agregados en forma de racimo de uva, no son compactos y tienen una estructura blanda y esponjosa con multitud de poros internos, que les dan la capacidad de retener agua y de reaccionar de diferentes maneras; adsorción, complejación, intercambio iónico, etc., como lo mencionan Zapata & Osorio (citados por Márquez & Cely<sup>77</sup>). Los ácidos húmicos contienen más carbono y menos H y O que los ácidos fúlvicos, es decir, tienen un carácter más aromático y menos oxidado, son extraíbles con reactivos alcalinos, su movilidad es menor a la de los ácidos fúlvicos, favorecen la estructura del suelo y establecen principalmente relaciones con las arcillas tipo 2:1, de acuerdo con Pinzón (citado por Márquez & Cely<sup>78</sup>), además presentan una fracción soluble en etanol que se conoce como ácidos himatomelánicos; estos son de color marrón o pardo rojizo.

- **Huminas:** se refieren a la fracción del humus más resistente a la descomposición, la cual solamente es soluble en NaOH caliente, ni en ácido, ni en álcali. Son componentes de la fracción humus del suelo. Están formadas por polímeros de alto peso molecular y unión orgánica de color oscuro. Muy resistente al ataque microbiano, por lo que son de gran estabilidad y se acumulan en los suelos. Son las que confieren el color oscuro a los suelos, especialmente a los horizontes superiores; las huminas se producen por condensación de sustancias orgánicas, pero también se pueden producir por transformación de sustancias no huminicas del suelo, como los ácidos orgánicos, los azúcares aminados, etc., como lo refiere Nuñez (citado por Márquez & Cely<sup>79</sup>).

Zapata & Osorio (citados por Márquez & Cely<sup>80</sup>), afirman que las huminas no se extraen con soluciones alcalinas del suelo, estas se considera que son ácidos húmicos que han perdido la capacidad de disolverse en álcali, debido

---

<sup>77</sup> Ibid.

<sup>78</sup> Ibid

<sup>79</sup> Ibid.

<sup>80</sup> Ibid.

a la alteración de las propiedades químico – coloidales, provocadas por desecación e interacción de los ácidos húmicos con la parte inorgánica del suelo. Las huminas representan alrededor del 20% de la materia orgánica del suelo, constituyen fracciones heterogéneas de naturaleza y origen muy diferente y son difícilmente aislables.

La materia orgánica del suelo también se puede caracterizar de acuerdo a métodos físicos de fraccionamiento. Los métodos físicos se pueden agrupar en tres grandes grupos: tamizado, sedimentación y densitometría. En la materia orgánica del suelo total existe una fracción de gran tamaño ( $> 53 \mu\text{m}$ ) cuyo contenido de COS es conocido como carbono orgánico particulado (COP) o C orgánico lábil que es más activo y de rápida descomposición como lo reportan Franzlubbbers & Arshad<sup>81</sup>.

---

<sup>81</sup> FRANZLUBBERS A. & ARSHAD M. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture. En: Soil Sci. Soc. Am. Journal, 1997. 61: 1382-1386.

## **7. METODOLOGÍA**

### **7.1. DEFINICIÓN DE HIPÓTESIS, VARIABLES E INDICADORES**

El Páramo La Cortadera, ubicado en el departamento de Boyacá tiene una alta capacidad de secuestro de carbono en sus diferentes formas y, por ende, es un ecosistema de gran importancia para mitigar el cambio climático.

#### **7.1.1. Variables**

Fracciones de carbono orgánico, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, carbono extractable, profundidad, tipo de cobertura vegetal y/o uso del suelo.

### **7.2. PRESENTACIÓN DE ETAPAS: (MUESTRAS, INSTRUMENTOS, PROCEDIMIENTOS, TÉCNICAS DE ANÁLISIS, PLANTAS PILOTOS, ACTIVIDADES Y DEMÁS ESTRATEGIAS METODOLÓGICAS REQUERIDAS PARA LA INVESTIGACIÓN)**

La metodología empleada para la realización del presente estudio incluye:

#### **7.2.1. Ubicación área de estudio**

El presente trabajo se realizó en el páramo La Cortadera, el cual, según Corpoboyacá – Fundación 2Ecosistema Colombia<sup>82</sup> tiene una extensión de 27.031,86 hectáreas. Se encuentra en jurisdicción del departamento de Boyacá entre los municipios de Pesca, Toca, Tuta y Siachoque, en coordenadas N05°32'13.7" W 0.73°06'50.5" y rango altitudinal de 3300-3815m.

Este páramo se encuentra conformando un corredor hacia el sur-centro de la cuenca del Río Chicamocha, según la Universidad Nacional de Colombia & la

---

<sup>82</sup> CORPOBOYACA & ECOSISTEMA COLOMBIA. Evaluación del Estado de Conservación de Cuatro Especies de Frailejones Amenazadas (*Espeletia paipana*, *Espeletia chocontana*, *Espeletia oswaldiana*, *Espeletia brachyaxiantha subsp. pescana*) del Departamento de Boyacá. 2008. Tunja.

UPTC<sup>83</sup>. Según CORPOBOYACA-FUNDACIÓN ECOSISTEMA COLOMBIA<sup>84</sup> uno de los páramos más afectados es La Cortadera, ya que la cobertura vegetal se encuentra muy fragmentada y ha sido remplazada por pastizales a causa de los cultivos (principalmente de papa) y el pastoreo que llegan hasta las zonas más altas montañas.

Es claro que Boyacá es el departamento con mayor número de frailejones y extensión de páramos en el mundo, sin embargo, las actividades mineras están tomando más fuerza que las medidas en pro de la conservación, y de no tomarse las medidas necesarias, en poco tiempo se estará contribuyendo a la pérdida irreparable de biodiversidad y disminución de la oferta de bienes y servicios por la disminución de coberturas vegetales por el cambio de uso de suelo.

### **7.2.2. Muestreo**

La toma de muestras se realizó empleando el método de muestreo aleatorio simple, seleccionando un total de 70 puntos, donde se obtuvieron muestras de suelo a dos profundidades distintas y en zonas con diferentes usos del suelo (vegetación nativa, cultivos y pastizales). El muestreo aleatorio simple se caracteriza porque cualquier punto de muestreo presenta la misma probabilidad de ser seleccionado y esta probabilidad es independiente entre puntos. Esto significa que la selección de un determinado punto de muestreo no tiene ninguna influencia sobre la probabilidad de que cualesquiera otros puntos de muestreo sean seleccionados. La aplicación de este modelo exigió que el área de estudio sea dividida en localizaciones o unidades de muestreo, cada una de las cuales fue candidata a ser muestreada y, por tanto, a convertirse en un punto de muestreo.

Sevink & Lips<sup>85</sup> recomiendan que para cada muestreo es necesario un mínimo de tres réplicas en el caso del suelo. Sin embargo, Kinka et al.<sup>86</sup> afirman que para que un muestreo de suelos sea representativo se deben tomar 10 muestras por hectárea, por lo que se debe tener especial cuidado con los datos extrapolados para cada área de estudio, dado que bien pueden no ser representativos.

---

<sup>83</sup> UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES & UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA. Plan de Ordenación y Manejo Ambiental de la Cuenca Alta del Río Chicamocha. Diagnóstico. Informe final inédito. Tunja, 2006.

<sup>84</sup> CORPOBOYACA & ECOSISTEMA COLOMBIA. Op. Cit.

<sup>85</sup> SEVINK, J. & LIPS, J. Humus forms, humus description, sampling. Documento de discusión presea grupo de trabajo sobre unificación de metodologías en las áreas de trabajo del Proyecto Tropenbos. 1987

<sup>86</sup> KINKA, K. et al. Taxonomic classification of humus forms in ecosystems o British Columbia. First approximation. Province of British Columbia. Ministry or forest, 1981. Vancouver, Canada.

A su vez se trazó una parcela de 4 m<sup>2</sup>, en cada una de las coberturas mencionadas, a las que se les removió la capa vegetal con el fin de evaluar la dinámica de las fracciones de carbono durante un periodo de cuatro meses. Se verificó que no retoñara ningún tipo de plantas durante esta época de estudio y mensualmente se tomaron y analizaron dos muestras en cada área (profundidad 0 -15 cm y 16 -30 cm).

En cada uno de los puntos seleccionados, se tomaron muestras a dos profundidades distintas, una entre 0 y 15 cm y la otra entre 15 y 30 cm; las cuales fueron trasladadas al laboratorio de suelos de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, de acuerdo con los protocolos para la recolección y análisis de suelos establecidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC<sup>87</sup>

### 7.2.3. Procesamiento de la muestra

Las muestras de suelo del Páramo La Cortadera fueron analizadas siguiendo los protocolos para métodos analíticos establecidos por el IGAC.<sup>88</sup>

- Se tomaron aproximadamente 750 gramos de suelo y se depositaron en una bolsa de polietileno.
- Se pudo a secar la muestra en un horno a una temperatura inferior a 40°C, revolviéndola periódicamente para asegurar un secado homogéneo.
- Se tamizó la muestra utilizando un tamiz No. 10, posteriormente se empacaron en la bolsa de polietileno previamente marcada y se dispuso para su análisis.

#### ***Separación de fracciones de Carbono***

- Se tomaron entre 500 mg – 1g de suelo seco y tamizado en un tamiz de 2mm.
- Se agregaron 10 ml de NaOH 0.1N y se agitó por 30 minutos.
- Posteriormente se centrifugo a 3000 rpm durante un periodo de 20 minutos, cuyo sobrenadante se dividió en dos partes iguales (A y B).
- La parte A, correspondiente a la fracción de **carbóno extractable**, se depositó en un Erlenmeyer de 125ml, donde se calentó a una temperatura menor de 60°C, hasta obtener 1/10 de la inicial.

---

<sup>87</sup> IGAC. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos, 1990. Bogotá, Colombia.

<sup>88</sup> Ibid.

- La parte B se depositó en un Erlenmeyer, donde se le agregaron 20ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 0.5 M hasta que el pH llegara a 2. Luego se dejó en reposo durante 2 horas, para finalmente centrifugarlo durante 10 minutos a 3000rpm.
- El sobrenadante (parte C) se calentó a temperatura menor a 60°C hasta quedar 1/10 de la parte inicial. Este correspondió a la **fracción ácidos fúlvicos**.
- Al residuo o precipitado (parte D), correspondiente a la **fracción de ácidos húmicos**, se le agregaron 20ml de NaOH al 0.1N, se agitó durante 15 minutos y se calentó a temperatura menor a 60°C hasta quedar 1/10 de la parte inicial.

### ***Determinación de Carbono (Digestión vía húmeda Walkley – Black***

En las tres fracciones obtenidas anteriormente se determinó el carbono.

#### **♣ Etapa de extracción**

- Se agregaron con dispensador la solución de dicromato de potasio 1N y de ácido sulfúrico (Tabla 1).

**Tabla 1.** Cantidad de solución

<b>Peso de suelo (g)</b>	<b>Dicromato de potasio (ml)</b>	<b>Ácido sulfúrico (ml)</b>
0.1 (orgánico)	20	40
0.1 – 0.3 (negros y pardos oscuros)	10	20
0.5 – 1.0 (claros y arenosos)	5	10

- Se preparo el blanco de proceso (Bp) por cada volumen de dicromato de potasio y ácido sulfúrico agregados.
- En la campana de extracción se agregó lentamente el dicromato de potasio 1N y se agitará la muestra para dejarla homogénea agregando rápidamente el ácido sulfúrico concentrado y nuevamente se agitó vigorosamente durante 30 segundos.
- Se dejó en reposo durante 30 minutos bajo la campana de extracción.
- Se agregaron entre 50 y 100 ml de agua destilada.
- Se dejó enfriar la solución.



### ♣ Etapa de cuantificación

- Se agregó con pipeta 1mL de ácido fosfórico concentrado y se agitó la solución, adicionando 5 gotas de indicador de ortofenantrolina y titulando.
- Se valoraron los blancos de proceso con la solución de sulfato ferroso armónico 0.5 N o sulfato ferroso 1N hasta el viraje de la solución de verde a marrón.
- Se anotó el volumen gastado para cada blanco de proceso en la hoja registro.
- Luego se realizó la titulación de la muestra control y de la muestra de suelo; anotando el volumen gastado en la hoja de registro.
- Finalmente se efectuaron los cálculos para hallar el porcentaje de carbono orgánico, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\%C.O. = \frac{(Bp-M) \times N \times 0.003 \times (100 * pw)}{Pm}$$

Donde:

**%C.O.**= Porcentaje de carbono orgánico

**Bp**= ml de sulfato ferroso gastados en la titulación del blanco

**M** = ml de sulfato ferroso gastados en la titulación de la muestra

**V** = ml de dicromato de potasio agregados al blanco

**N**= normalidad el sulfato ferroso, como resultado de la titulación de los blancos implementados = V/Bp

**0.003**= peso en g de un meq. de carbono

**pw** = % de humedad en suelo seco a 105°C (factor de corrección de humedad)

**pm** = peso muestra en g

#### 7.2.4 Calculo de carbono orgánico del suelo

En la determinación del carbono en el suelo se usó la fórmula propuesta por el IPCC (2007) citado por Cely et al.<sup>89</sup>:

$$COS = (\%COS) * \text{densidad aparente} * \text{profundidad} * (1 - \text{fragmentos}) * 10$$

<sup>89</sup> CELY et al. Suelos de los páramos de Boyacá: Ecosistemas potenciales para la captura de Carbono. 2016. Tunja.

Donde:

<b>COS=</b>	carbono orgánico almacenado para el suelo de interés, t/ha
<b>(%COS) =</b>	concentración de carbono orgánico en el suelo en una masa dada gC/kg suelo
<b>Densidad aparente=</b>	masa de suelo por volumen de muestra, Mg/m <sup>3</sup>
<b>Profundidad=</b>	espesor o profundidad del suelo para la muestra, m
<b>Fragmentos gruesos=</b>	1 – (% volumen de fragmentos gruesos/100).

Finalmente se debe multiplicar por 10 para convertir las unidades a toneladas de carbono por hectárea (tC/ha).

Una tonelada de carbono equivale a 3,67 toneladas de CO<sub>2</sub>e (obtenido en razón de los pesos moleculares 44/12). Para saber la cantidad de CO<sub>2</sub>e emitido o almacenado a partir de la cantidad de carbono de un determinado depósito se debe multiplicar esta por 3,67<sup>90</sup>.

### 7.3. PROCESO DE RECOLECCIÓN, ORGANIZACIÓN, SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

En campo se registraron datos como georreferenciación, usos de suelo, tipo de cobertura vegetal y grado de afectación, los cuales se interrelacionaron con la capacidad de secuestro de carbono del suelo. El análisis experimental de las muestras se realizó de acuerdo a los protocolos para la determinación de materia orgánica establecidos por el IGAC<sup>91</sup>.

Los datos fueron procesados por análisis geoestadístico, con el fin de obtener las gráficas correspondientes y poder analizar la dinámica de las fracciones de carbono cuando se retira la cobertura vegetal. Empleando la herramienta de interpolación mediante distancia inversa ponderada – IDW, del programa ArcGis 9.0 se obtuvieron los respectivos mapas de tendencia que muestran la variabilidad espacial de los contenidos de carbono orgánico presente en las distintas fracciones de la materia orgánica.

---

<sup>90</sup> RÜGNITZ et al. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Lima, Perú: Centro Mundial Agroforestal, Consorcio Iniciativa Amazónica. 2009

<sup>91</sup> Ibid.

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1. CONTENIDOS DE CARBONO ORGÁNICO EN SUS DIFERENTES FRACCIONES

#### 8.1.1 Análisis factorial para cobertura, profundidad y fracción de carbono

Se obtuvo en promedio 14,62% con 11,96 de desviación estándar de carbono orgánico en el Páramo La Cortadera, Boyacá. Al revisar en las coberturas clasificadas, se observa que la vegetación nativa es la que cuenta con el valor de carbono orgánico mayor, mientras que cultivos y pastizales obtuvieron el mismo valor, tal y como se ve en la tabla 2.

**Tabla 2.** Estadística descriptiva del carbono orgánico por cobertura

Estadístico	TOTAL	Cultivos	Vegetación nativa	Pastizales	Otros
Media	14,62	12,73	20,27	12,72	2,60
Mediana	11,82	12,97	17,50	12,53	1,56
Moda	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Desviación estándar	11,92	6,40	16,09	8,17	3,00
Varianza	142,11	40,92	258,93	66,74	8,99
Curtosis	4,69	0,05	2,85	1,76	2,33
Coef. de asimetría	1,75	0,43	1,59	1,09	1,57
Rango	69,04	24,04	66,92	32,37	6,56
Mínimo	0,30	2,09	2,42	1,59	0,36
Máximo	69,34	26,12	69,34	33,96	6,92
Error típico	1,01	1,65	2,72	2,04	1,50
Cuenta	140	15	35	16	4

El tipo de cobertura de cultivos y pastizales mostró datos cercanos, mientras que la cobertura nativa obtuvo la media más alta, aunque la desviación estándar fue también muy alta, mostrando una amplitud entre los datos importante, pudiéndose deber a la diversidad de la vegetación nativa en el páramo La Cortadera, Amar As<sup>92</sup> registró 58 especies de plantas pertenecientes a 23 familias (tabla 4).

<sup>92</sup> MATAALLANA, C. Concepto previo declaratoria Parque Natural Regional Cortadera. Del instituto Alexander von Humboldt a la Corporación Autónoma Regional de Boyacá. 2009

El encontrar valores elevados de carbono bajo la vegetación natural parece ser un hallazgo dentro de los páramos andinos<sup>93</sup>, debido a que la vegetación natural protege el suelo de la precipitación que junto a la temperatura, son los factores más importantes en la dinámica del secuestro de carbono<sup>94</sup> explicando los datos encontrados. La temperatura baja, típica en ecosistemas de páramo, favorecen una continua absorción de CO<sub>2</sub> atmosférico, aunque este se hace lento<sup>95</sup>

Los cultivos podrían ser favorables en la medida en que fueran cultivos de cobertura, en los que se estima que logran un secuestro global de carbono de  $0,12 \pm 0,03 \text{ Pg C año}^{-1}$  compensando el 8% de las emisiones anuales directas de gases de efecto invernadero provenientes de la agricultura<sup>96</sup>. En el caso de la Cortadera, por los datos obtenidos, los cultivos encontrados no favorecen la adaptación al cambio climático por la cantidad de carbono hallado.

**Tabla 3.** Análisis de Varianza para Medida - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Cobertura	525.681	2	262.84	12.11	0
B: Profundidad	36.7131	1	36.7131	1.69	0.1941
C: Fracción	2002.2	2	1001.1	46.14	0
INTERACCIONES					
AB	53.645	2	26.8225	1.24	0.2916
AC	167.705	4	41.9263	1.93	0.1042
BC	26.5999	2	13.3	0.61	0.5422
ABC	20.1969	4	5.04921	0.23	0.9199
Error	8722.21	402	21.697		
Total	12218.7	419			

De acuerdo con el análisis de varianza realizado (Tabla 3), el valor -P del ANOVA para interacción de cobertura y profundidad (AB) corresponde a 0.2916; para cobertura y fracción (AC)  $p=0.1042$  y para profundidad y fracción (BC),  $p=0.5422$ ; y

<sup>93</sup> CASTAÑEDA-MARTÍN, A., MONTES-PULIDO, C.R. Carbono almacenado en páramo andino. Entremado. 2017. Vol 13 (1): 210-221

<sup>94</sup> DEB MORAES, J. C., LAL, R., CERRI, C.C., LORENZ, K., HUNDRIA, M., CESAR, P. & CARVALHO, F. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. Environment international 2017 98: 102-112

<sup>95</sup> MÁRQUEZ, L.E. & CELY, G.E. El páramo y su potencial de captura de carbono; experiencia páramo La Cortadera-Boyacá. Memorias Congreso de investigación y pedagogía III nacional y II internacional. 2013.

<sup>96</sup> POEPLAU, C. & DON, A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. Agriculture, Ecosystems and Environment. 2015 (200): 33-41

para los tres efectos (ABC) de 0.9199, indicando que la media de las variables mencionadas no muestra diferencia entre ellas, debido a que el valor de P es mayor a 0.05, siendo el ese el valor de significancia para el presente estudio.

**Tabla 4.** Análisis de Varianza para Medida - Suma de cuadrados de las coberturas y la profundidad

	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
<b>Pastizal</b>	Entre grupos	57,665	2	28,832	38,201	1,0078E-07	3,466
	Dentro de los grupos	15,850	21	0,754			
	Total	73,516	23				
<b>Nativo</b>	Entre grupos	501,480	2	250,740	139,296	1,1169E-11	3,554
	Dentro de los grupos	32,400	18	1,801			
	Total	533,881	20				
<b>Cultivo</b>	Entre grupos	0,007	2	0,003	0,161	0,85320201	3,554
	Dentro de los grupos	0,431	18	0,023			
	Total	0,438	20				
<b>Profundidad</b>	Entre grupos	310,141	23	13,484	1,018	0,46274438	1,756
	Dentro de los grupos	635,391	48	13,237			
	Total	945,533	71				

La interacción cobertura y profundidad son variables que han mostrado comportamientos diferentes en relación con los niveles de carbono hallados en el suelo, la cobertura parece ser una variable de peso para que el suelo secuestre carbono, mientras la profundidad (junto a la elevación de la zona) se han determinado como complementos en los modelos explicativos en la captación de carbono en el suelo, más no son variables determinantes<sup>97</sup>, encontrando que la profundidad en el páramo La Cortadera no mostró diferencias entre ellas en las diferentes coberturas (tabla 4), apoyando el que no es una variable que por si sola explique la presencia de la cantidad de carbono en el suelo.

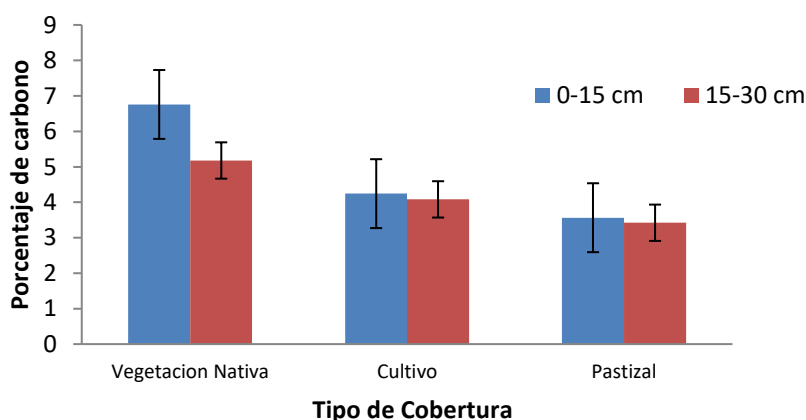
<sup>97</sup> POEPLAU, C. Op. Cit.

### 8.1.2 Cobertura y profundidad

Para realizar el análisis de la cobertura en relación con la profundidad, se calculó el carbono total que obedece al promedio de datos de las tres fracciones (extractable, ácido fúlvico y ácido húmico).

De acuerdo con la figura 4, la concentración de carbono es mayor a profundidad 0-15cm que a 15-30cm en todas las coberturas; presentándose una diferencia más significativa en la vegetación nativa. Lo anterior coincide con los resultados reportados por Handayani et al.<sup>98</sup> quienes evidenciaron que, en la mayoría de los casos, las concentraciones de carbono fueron superiores en las muestras tomadas de 0 -15cm que en las de 15 – 30cm, cuyo comportamiento se debe al aporte de la hojarasca, producción y exudación de raíces, las cuales una vez en el suelo se metabolizan y son mineralizadas por los microorganismos.

**Figura 4.** Promedio de Carbono total según la profundidad en cada cobertura



De igual manera, en la Figura 4 se evidencia que la vegetación nativa presentó mayor contenido de carbono orgánico (6,76 a profundidad de 0 – 15 cm y 5,18 a 15-30 cm) en relación con las otras coberturas, lo cual posiblemente se debe al bajo nivel de resiliencia de los suelos de páramo, que, al ser sometidos a las actividades propias para la siembra y pastoreo, tienden a liberar a la atmósfera una proporción del carbono por efectos de oxidación. Estos resultados coinciden con los de Lozano<sup>99</sup>, cuyo autor afirma que las capas superficiales de suelos cultivados presentan significativamente menores cantidades de carbono y una tendencia a la

<sup>98</sup> HANDAYANI, I. et al. Soil organic matter fractions and aggregate distribution in response to tall fescue stands. Plant and soil science faculty publications. 2010. 5(1): 1-10

<sup>99</sup> LOZANO, Z. et al. Fracciones de la materia orgánica del suelo bajo sistemas de siembra directa y cultivos de cobertura. Revista Fac. Agronómica, 2011. 28: 35-56

migración de éste a las capas más profundas con respecto a los suelos no intervenidos.

La Figura 4 permite establecer que la cobertura de cultivos presentó depósitos de carbono orgánico de 4.08 y 4.24 en cada una de las profundidades respectivamente, evidenciándose que no existe una variación relevante entre ambas profundidades. Diekow et al.<sup>100</sup> en Brasil encontraron una tendencia similar, donde cultivos con asociaciones de cereales y leguminosas almacenaron mayores cantidades de carbono a partir de 17.5cm, lo que explicaron por la posible disposición de material orgánico por medio del aporte directo de las raíces o por el transporte de residuos orgánicos a través del perfil por la meso y macrofauna.

Las áreas de pastizal presentaron los menores contenidos de carbono lo cual se debe probablemente a que según lo expresado por Carvajal et al.<sup>101</sup> esta actividad tiene efectos profundos en la estructura y funcionamiento de los páramos, donde el pisoteo del ganado genera compactación del suelo y pérdida de las propiedades físicas, químicas y biológicas retenedoras de agua y carbono.

### **8.1.3 Cobertura y fracción**

Para analizar las variables de cobertura y fracción, se calculó el promedio de carbono teniendo en cuenta las dos profundidades. De acuerdo con la Figura 5, las tres fracciones de carbono presentan porcentajes más altos en la cobertura de vegetación nativa y más bajos en pastizal, lo cual se debe probablemente a que los ecosistemas con vegetación nativa contienen más carbono por unidad de superficie que cualquier otro tipo de uso del suelo, siendo relevantes en los procesos de captura de carbono.

Así mismo, la disminución en las fracciones de carbono en cultivos y pastizales posiblemente responden a las actividades de deforestación, quema de la vegetación natural, adecuación del suelo con fertilizantes y arado para que pueda ser cultivado, lo cual se complementa con lo expresado por Iglesias et al.<sup>102</sup>, quienes indican que la labranza por la acción física directa, destruye los macroagregados y provoca la pérdida de su estabilidad debido a la reducción de los contenidos de materia

---

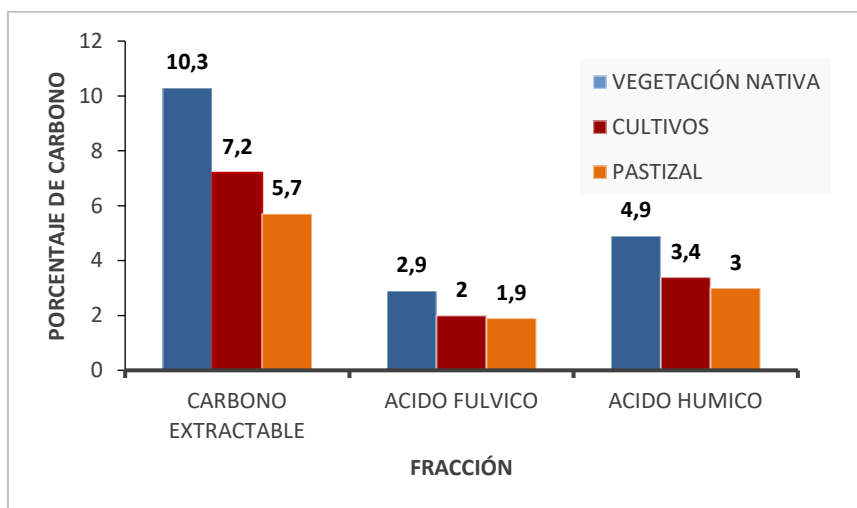
<sup>100</sup> DIEKOW, J. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. *Soil and Tillage Research*, 2005. 81, 87-95.

<sup>101</sup> CARVAJAL, A. et al. Op. Cit.

<sup>102</sup> IGLESIAS, J. et al. Cambios en la estabilidad de agregados de suelos con diferente labranza. 2018.

orgánica por exposición de las fracciones que se hallaban protegidas dentro de sus estructuras.

**Figura 5.** Promedio de carbono según cobertura en cada fracción



De acuerdo a lo indicado por Reicosky<sup>103</sup> en el proceso de cultivo de suelos nativos se estima que hay una pérdida de carbono orgánico en la medida que la materia orgánica previamente protegida, por efectos de remoción de la capa del suelo, queda expuesta a la atmósfera lo que favorece los procesos de oxidación.

Según Parent & Parent<sup>104</sup> la disminución en los contenidos de carbono orgánico ocurre como resultado a las actividades de quemas, recolección de leña o pastoreo excesivo sin que haya retorno de materiales que compensen dichas pérdidas; y por efectos del drenaje y la labranza que aceleran la oxidación de la materia orgánica (MO), lo cual conduce generalmente a reducir la capacidad de retención de agua ocasionando una disminución en la productividad y en la cobertura vegetal, sin renovación de la MO, facilitando la erosión.

#### 8.1.4 Fracción y profundidad

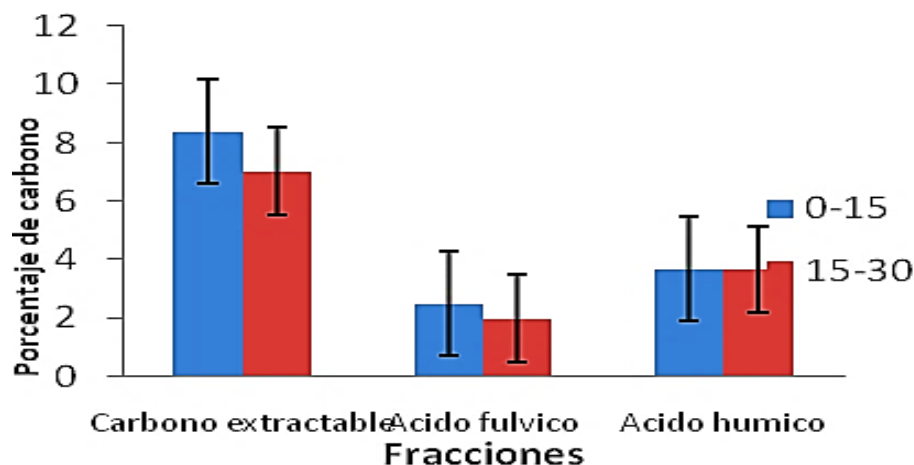
<sup>103</sup> REICOSKY, D. Op. Cit.

<sup>104</sup> PARENT, S-E. & PARENT, L. Biochemical fractionation of Soil organic matter after incorporation of organic residues. Open Journal of Soil Science, 2015. 135-143



Para evaluar la profundidad en relación con la fracción se obtuvo el promedio de los porcentajes de carbono en los tres tipos de cobertura, donde las fracciones de carbono presentaron mayor porcentaje de carbono orgánico a profundidad de 0-15 cm que a 15-30 cm; siendo el carbono extractable el que presentó mayor cantidad de carbono en ambas profundidades y el ácido fúlvico el de menor cantidad (Figura 6). Las cantidades de ácido húmico son muy similares en las dos profundidades presentando valores de 3.69 y 3.65 a profundidad de 0-15cm y de 15-30 cm respectivamente, presentando una variación de 0.04.

**Figura 6.** Promedio de carbono según profundidad en cada fracción



Lo observado en la Figura 6, se explica porque los ácidos fúlvicos son de bajo peso molecular, tienen mayor contenido de oxígeno, pero menor contenido de carbono que los ácidos húmicos que tienen un alto peso molecular. Como regla general hay más carbono y menos oxígeno en el ácido húmico que en el fúlvico. Esto lleva al ácido fúlvico a tener mayor cantidad de grupos ácidos con una mayor capacidad de complejación, y a ser soluble a todo pH, actuando significativamente en la movilidad de cationes metálicos en el suelo. Por otro lado, el ácido húmico por ser de mayor peso molecular que el ácido fúlvico, hace pensar que está más polimerizado y es de mayor estado de humificación, tal y como lo explican Lozano et al.<sup>105</sup>

## 8.2 DINÁMICA DE LAS FRACCIONES DE CARBONO EN PARCELAS CON TRES TIPOS DE USO DE SUELO

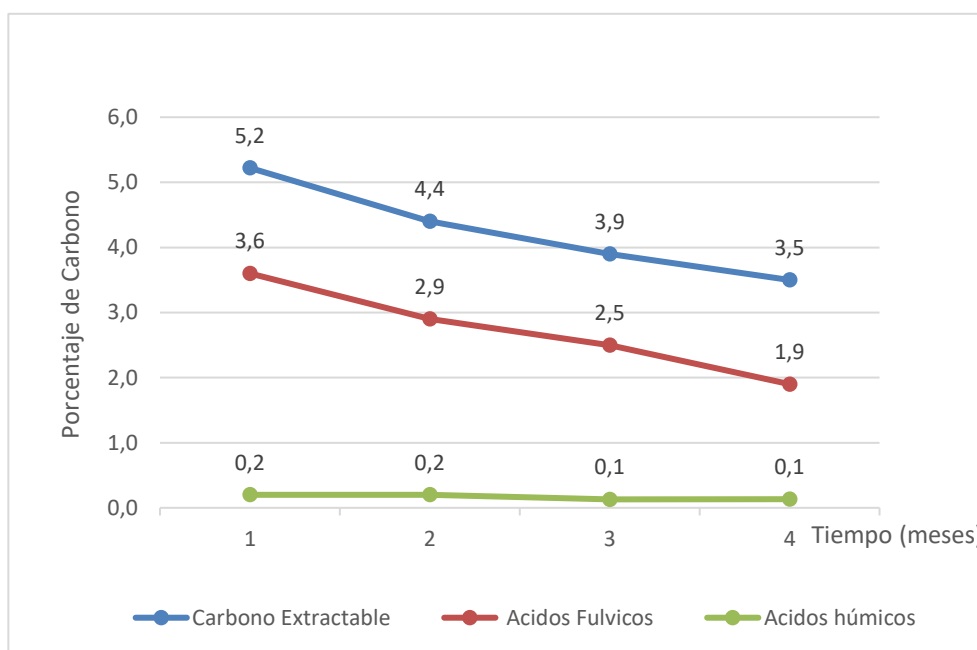
<sup>105</sup> LOZANO, Z. et al. Op. Cit.

Para evaluar la dinámica de las fracciones de carbono en los tres tipos de uso del suelo, se retiró la cobertura vegetal, y se tomó una muestra a cada profundidad, durante 4 meses, obteniendo los siguientes resultados:

### 8.2.1 Parcela uso de suelo pastizal

Se seleccionó una parcela ubicada en las coordenadas 5°33'23,7"N 73°7'5,9"O, a 3408 metros de altitud, caracterizada por presentar plantas herbáceas pertenecientes a la familia Poaceae, destinada a la ganadería y ausencia total de vegetación nativa, sin presencias de árboles, ni arbustos.

**Figura 7.** Porcentaje de C en parcela de pastizales – profundidad de 0-15cm

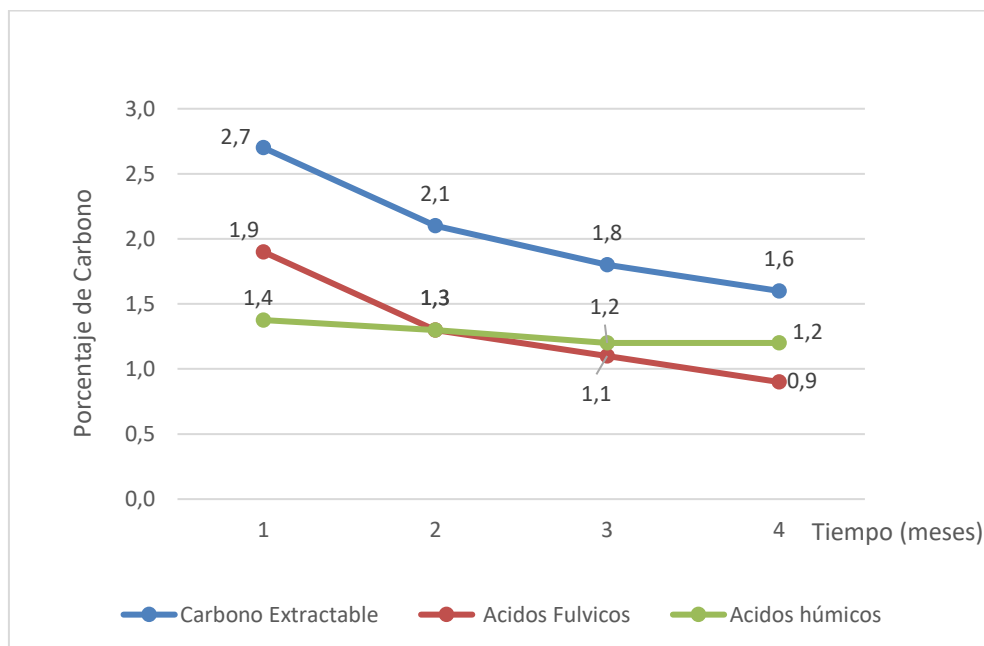


De acuerdo con la Figura 7, durante el periodo de monitoreo, la fracción de ácidos húmicos disminuyó en 0,1 el porcentaje de carbono del suelo, siendo una variación muy baja, en comparación con las otras formas evaluadas, las cuales mostraron una disminución constante, lo anterior probablemente se debe a que esta fracción es considerada la más estable.

A profundidad de 0-15 cm, la fracción de carbono extractable fue la que presentó mayor variación, luego de retirar la cobertura vegetal y monitorear durante los 3 meses siguientes, disminuyendo 0,8 en el primer mes, 0,5 en el segundo y 0,4 en el último mes de muestreo; lo cual se debe probablemente a que esta fracción es la

más lábil, es decir la menos estable, por lo tanto, es la más propensa a ser reliberada nuevamente a la atmósfera.

**Figura 8.** Porcentaje de C en parcela de pastizales – profundidad de 15-30cm



En la Figura 8, los ácidos húmicos presentaron un comportamiento similar al observado en la medición de 0-15cm de profundidad, disminuyendo en 0,2 el porcentaje de carbono. Así mismo, se observó que el carbono extractable y los ácidos fúlvicos presentaron una disminución constante, siendo más notoria en el segundo mes, lo cual posiblemente se debió a que el suelo quedó más expuesto a los cambios de temperatura, lluvia y procesos de oxidación, luego de retirarse la cobertura vegetal.

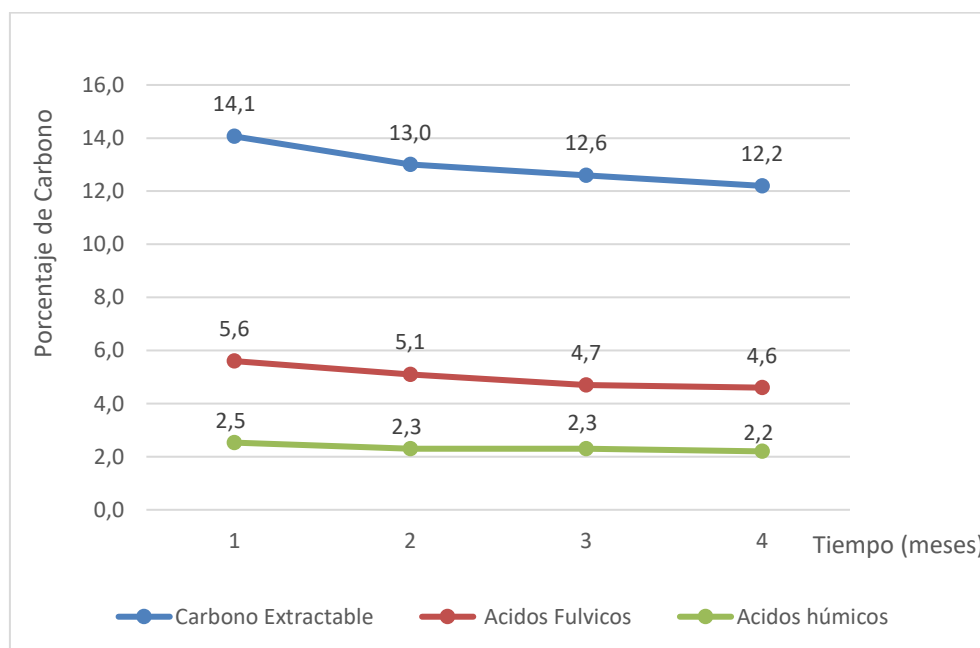
Se presentó mayor concentración de carbono en las muestras tomadas de 0-15 cm que de 15-30 cm, pudo deberse a los aportes por escorrentía realizados por la vegetación rastrera y los animales, ya que en el sector aledaño al punto de toma de muestra se observó desechos de ganado vacuno, los cuales son metabolizados y mineralizados por los microorganismos del suelo. Estos resultados, coinciden con

lo establecido por Segura et al.<sup>106</sup>, quien afirma que aquellos suelos que se destinan a la ganadería intensiva tienen contenido de COS más elevado

### 8.2.2. Parcela uso de suelo vegetación nativa

La parcela seleccionada se ubicó en las coordenadas 5°36'39,6"N 73°05'47,7"O, a 3252 m.s.n.m., cuya vegetación está representada principalmente hierbas, arbustos y bosques de especies nativas, dentro de las que se destacan especies de la familia Asteraceae, género *Espeletia*. Los datos obtenidos se relacionan en las Figuras 9 y 10.

**Figura 9.** Porcentaje de C en parcela de vegetación nativa – profundidad de 0-15cm

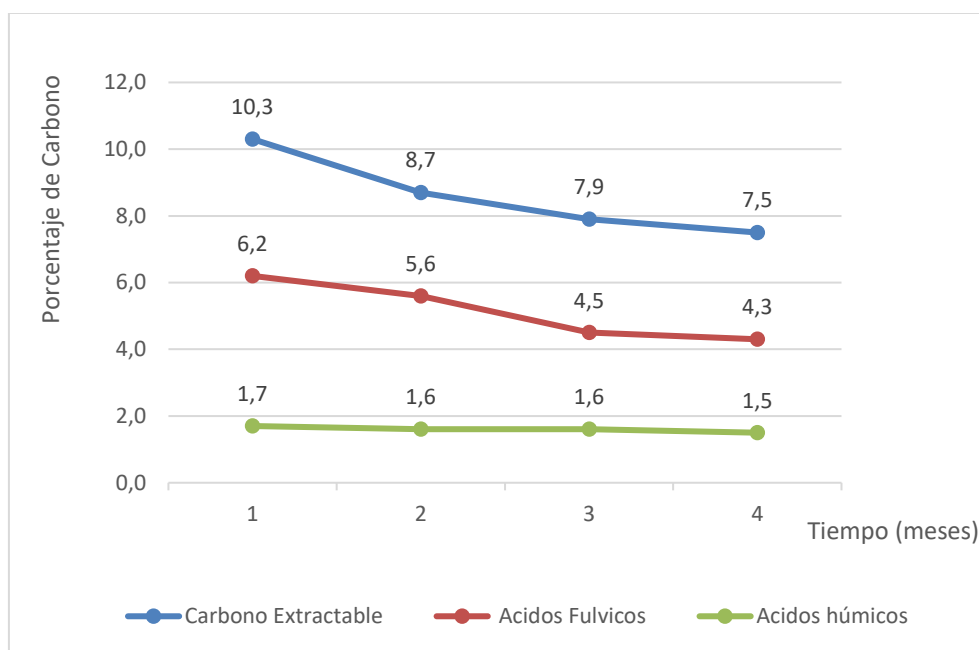


Para la vegetación nativa se evidenció un comportamiento similar al observado en los pastizales, donde los ácidos húmicos presentan una ligera disminución, mientras que las otras dos fracciones disminuyen constantemente durante todo el periodo de monitoreo, tal como se evidencia en la Figura 9; lo cual se debe a que al retirar la

<sup>106</sup> SEGURA, M. et al. Carbono orgánico de los suelos de México. TERRA Latinoamericana VOLUMEN 23 ÚMERO 1, 2005

cobertura vegetal el suelo queda expuesto al brillo solar directo, a cambios de temperatura y a precipitaciones directas, los cuales se consideran como los factores ambientales que inciden directamente en el contenido de carbono en el suelo.

**Figura 10.** Porcentaje de C en parcela de vegetación nativa – profundidad de 15-30cm

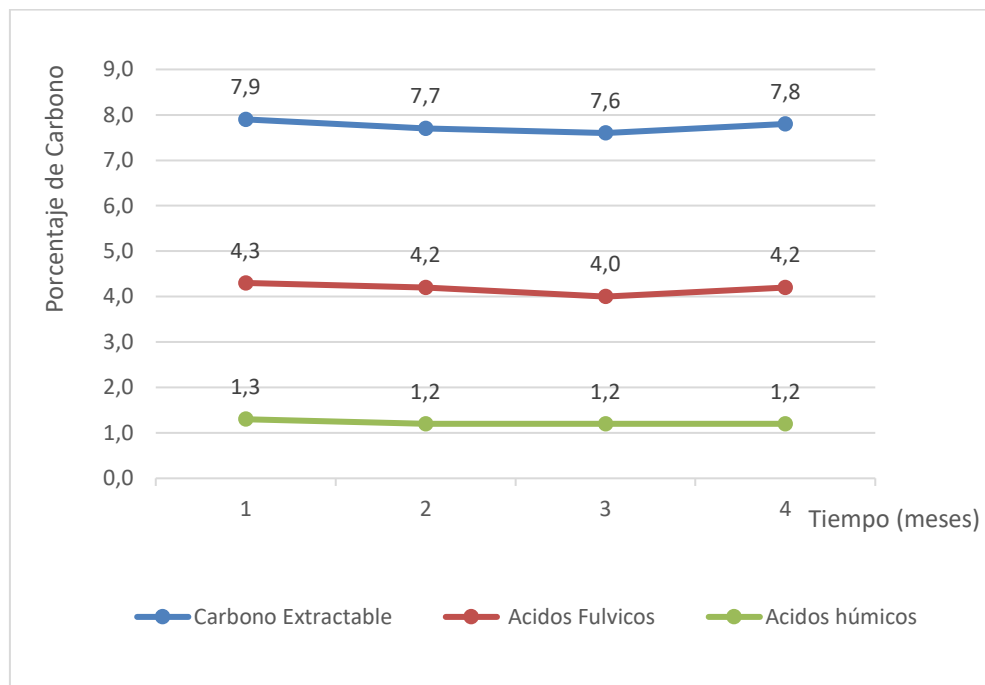


La Figura 10 muestra las concentraciones de las fracciones de carbono, a profundidad de 15-30cm, se presenta el mismo comportamiento evidenciado en los primeros 15 cm, donde el carbono disminuye progresivamente durante el periodo de muestreo. Aunque, se observa que el suelo superficial alberga más concentración de carbono que a 15 -30 cm de profundidad, debido a los aportes de material vegetal muerto que cae y entra a este ecosistema a descomponerse. En ésta parcela se logró evidenciar el efecto negativo que tiene la deforestación, con el fin de establecer cultivos y pastizales para uso agropecuario, ya que fue la parcela que presentó disminuciones más notorias en las concentraciones de las diferentes fracciones, principalmente de aquellas lábiles, demostrando que la exposición directa del suelo a las diferentes condiciones ambientales y físicas, causan oxidación acelerada de la materia orgánica y liberación de grandes cantidades de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

### 8.2.3. Parcela uso de suelo agrícola - cultivos

La parcela para evaluar la dinámica del carbono en suelos de cultivos se localizó en las coordenadas 5°33'41,9"N 73°8'8,8"O a 3215 m.s.n.m., en la cual para la toma de la primera muestra se encontraba en alistamiento del terreno para la posterior siembra de papa.

**Figura 11.** Porcentaje de C en parcela de cultivos – profundidad de 0-15cm

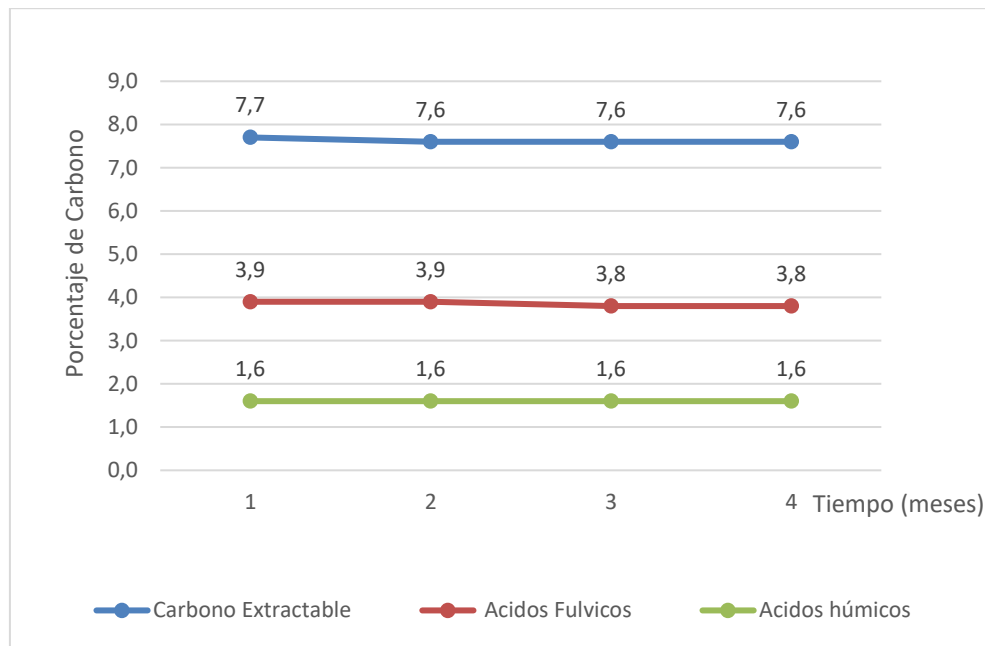


De acuerdo con la Figura 11, se observa que las fracciones de carbono orgánico presentan una dinámica diferente a la evidenciada en las anteriores coberturas vegetales, donde los ácidos húmicos y fúlvicos disminuyen ligeramente hasta el tercer mes y luego presentan un tenue aumento en el último mes, lo cual probablemente es consecuencia de la aplicación de fertilizantes que pudieron aportar carbono al suelo. Lo anterior, coincide con lo expuesto por Post & Kwon<sup>107</sup>, quienes afirman que se puede ganar o perder carbono del suelo dependiendo de las circunstancias específicas, como el uso de fertilizantes o la eliminación de la cobertura vegetal.

<sup>107</sup> POST, W. & KWON, K. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. Global Change Biology 6: 2000. 317-327

Así mismo se evidencia que los cultivos tienen un efecto en el secuestre y posterior mineralización de los cultivos, ya que al remover el suelo en la actividad de arado se alteran las propiedades físicas y químicas. Según con Healy, et al. <sup>108</sup> el aire del suelo tiene una mayor concentración de CO<sub>2</sub> respecto al aire atmosférico. Los gases entran o salen del suelo por flujo de masa y por difusión. El flujo de masa se produce debido a variaciones de temperatura y de presión entre las distintas capas del suelo y entre éste y la atmósfera, hacen que entre y salga aire del suelo arrastrando a todos sus componentes.

**Figura 12** Porcentaje de C en parcela de cultivos – profundidad de 15-30cm



De acuerdo con la figura 12, para el caso de la parcela de cultivo a profundidad de 15-30cm se observó que el carbono extractable y los ácidos fúlvicos presentaron una mínima disminución en el valor del porcentaje de carbono orgánico, mientras que los ácidos húmicos se mostraron constantes durante los cuatro meses de seguimiento, lo cual pudo deberse a que para el alistamiento de los terrenos se hace necesario el arado y la remoción de la cobertura vegetal natural, la cual a la hora de la toma de la primer muestra ya se había realizado.

<sup>108</sup> HEALY, R.W., STRIEGL, R.G., RUSSELL, T.F., HUTCHINSON, G.L., LIVINGSTON, G.P., 1996. Numerical evaluation of static-chamber measurements of soil-atmosphere gas exchange: Identification of physical processes. Soil Sci. Soc. Am. J. 60, 740-747

Las fracciones de carbono son de gran importancia teniendo en cuenta que el carbono orgánico del suelo afecta la mayoría de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo vinculadas con su calidad, sustentabilidad y capacidad productiva según Alvarado et al.<sup>109</sup>

En el Páramo la Cortadera se realizan siembras de monocultivos, lo cual conlleva a que el suelo cambie sus características y propiedades, deteriorándose con el tiempo; por lo tanto, requiere la aplicación de fertilizantes, los cuales aportan carbono y otros minerales al suelo, lo cual posiblemente responde al comportamiento presentado, aumentando a profundidad de 0-15 y presentando cambios muy leves en profundidad de 15-30cm, donde a pesar de que hay pérdidas de carbono por el arado del suelo, también hay aporte por parte de los fertilizantes.

Por lo anterior, se sugiere realizar cambios en la siembra tradicional. Poeplau et al.<sup>110</sup>, señalan que es de gran importancia de implementar un programa de abonos verdes junto con la rotación de cultivos, lo cual favorecería un potencial de secuestro de carbono orgánico en el suelo mundial en  $0,12 \pm 0,03$  Pg C año<sup>-1</sup>, lo que compensaría el 8% de las emisiones de gases de efecto invernadero anuales directos de la agricultura. De la misma manera Bockisch (citado por FAO<sup>111</sup>), afirman que muchos experimentos a largo plazo realizados en el mundo reconocen que la fertilización orgánica (abono animal, abono verde, cultivo intercalado y cultivo de cobertura) reconstruye la materia orgánica del suelo.

### **3.2.4 Análisis de la dinámica del carbono en todas las fracciones**

Una de las principales funciones ecosistémicas del suelo está relacionada con su papel como sumidero de carbono, al retirar la cobertura vegetal, sobreexplotarlos, modificar su estructura, talar los árboles y desarrollar actividades pecuarias sin un manejo adecuado, quedaría expuesto a la acción directa del sol, lo que propiciaría la desecación del mismo, cambiando su estructura y permitiendo que la materia orgánica se descomponga más rápidamente, convirtiéndose en un emisor de carbono a la atmosfera. Según Crowther et al. (citado por FAO<sup>112</sup>) el aumento de las temperaturas estimulará la pérdida neta de carbono del suelo a la atmósfera, lo

---

<sup>109</sup> ALVARADO, J. et al. Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. Colombia forestal, 2013. 16(1): 21-31

<sup>110</sup> POEPLAU, C. & DON, A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. Agriculture, Ecosystems and Environment. 2015 (200): 33-41

<sup>111</sup> FAO. Soil carbon sequestration for improved land management. World soil reports 96. Rome, 2001. 58 p.

<sup>112</sup> Ibid.



que conducirá a una retroalimentación positiva del ciclo clima-carbono terrestre que podría acelerar el cambio climático.

Teniendo en cuenta que el carbono se presenta en dos formas “lábil” y “estable” según Burdon (citado por Gonzales *et al*<sup>113</sup>), la primera de ellas comprende tejidos con una estructura química definida que con su relativa baja complejidad constituyen una fuente inmediata de carbono y energía para gran parte de la microfauna y microflora edáfica. Montenegro *et al.* (citado por Gonzales<sup>114</sup>) afirma que la fracción estable, presenta relaciones más o menos fuertes con la fracción mineral, la estructura y la estabilidad del suelo. Por lo anterior, aquellas fracciones lábiles son las que están más propensas de volver a la atmósfera.

En general, las tres fracciones presentaron el mismo comportamiento, demostrando que el uso del suelo y la cobertura vegetal influye significativamente en la captura y secuestro de carbono, evidenciándose disminución en los valores, durante el periodo de muestreo. Lo anterior, coincide con lo expuesto por Cely *et al.*<sup>115</sup> quienes afirman que el tipo de uso influye directamente en la capacidad de captura de carbono, por lo que, al analizar los diversos escenarios en los que se ha investigado el papel del COS como indicador y como medio de evaluación para estudiar el efecto del cambio climático, debe tenerse en cuenta que al ser parte del sistema suelo, hay muchos factores que inciden.

### **8.3 TONELADAS POR HECTÁREA DE CO<sub>2</sub> SECUESTRABLE EN LAS FRACCIONES DE MATERIA ORGÁNICA**

Para determinar las toneladas por hectárea de CO<sub>2</sub> almacenado en las fracciones de materia orgánica se aplicó la metodología presentada por Rüginitz *et al.*<sup>116</sup> multiplicando los valores obtenidos del Carbono orgánico del suelo por 3,67 (obtenido en razón de los pesos moleculares CO<sub>2</sub>/C)

---

<sup>113</sup> GONZALEZ, H.; ZAPATA, R. & SADEGHIAN – KHALAJABADI, S. Caracterización de los ácidos húmicos en suelos de la zona cafetera de Caldas. *Cenicafé*, 60 (1): 2009. p 25 - 40.

<sup>114</sup> MONTENEGRO G., H.; MALAGÓN C., D. Propiedades físicas de los suelos. Citado por: GONZALEZ, H.; ZAPATA, R. & SADEGHIAN – KHALAJABADI, S. Caracterización de los ácidos húmicos en suelos de la zona cafetera de Caldas. *Cenicafé*, 60 (1): 2009. p 25 - 40.

<sup>115</sup> CELY, G.; LOPEZ, J.; SERRANO, P.; BERNAL, O.; CELY, O.; MORENO, D. Suelos de los páramos de Boyacá: Ecosistemas potenciales para la captura de carbono. Primera Edición. Editorial Jotamar Ltda. 2016. 255p.

<sup>116</sup> *Ibid.*

### 8.3.1 Toneladas por hectárea de CO<sub>2</sub> almacenado en la fracción de Carbono extractable

De acuerdo con la Figura 13, la fracción de carbono extractable con profundidad de 0-15cm presentó rangos de almacenamiento de CO<sub>2</sub> entre 0,45 y 355,21 ton/ha. El valor más bajo correspondió al área de cultivo de pino, siendo esta una evidencia de los efectos negativos de estas especies al suelo, afectando la acidez del mismo, los microorganismos hospederos y por ende los procesos de descomposición que allí ocurren. Schlatter & Otero<sup>117</sup> afirman que el mantillo bajo pino muestra una estructura morfológica que indica que los procesos de descomposición son inhibidos, lo cual se debe en parte a su menor nivel de Ca y mayor relación C/N y a la composición orgánica de los tejidos del pino (más ricos en resina, grasas y lignina). Gadgil & Gadgil <sup>118</sup> demostraron que un factor inhibidor importante son las micorrizas simbiotes del pino, las cuales tienen un efecto bactericida. Por otro lado, Guo & Gifford <sup>119</sup> afirman que las plantaciones de pino reducen las reservas de carbono del suelo en 12 – 15% y Guo y Gifford se reportaron pérdidas de C hasta del 42% cuando se transforma la selva nativa para actividades agrícolas.

En relación con la profundidad (figura 13), se evidencian los picos más altos en profundidad de 0 -15cm debido probablemente a que es la capa donde se acumula mayor cantidad de restos vegetales y animales que influyen notablemente en las concentraciones de carbono en el suelo.

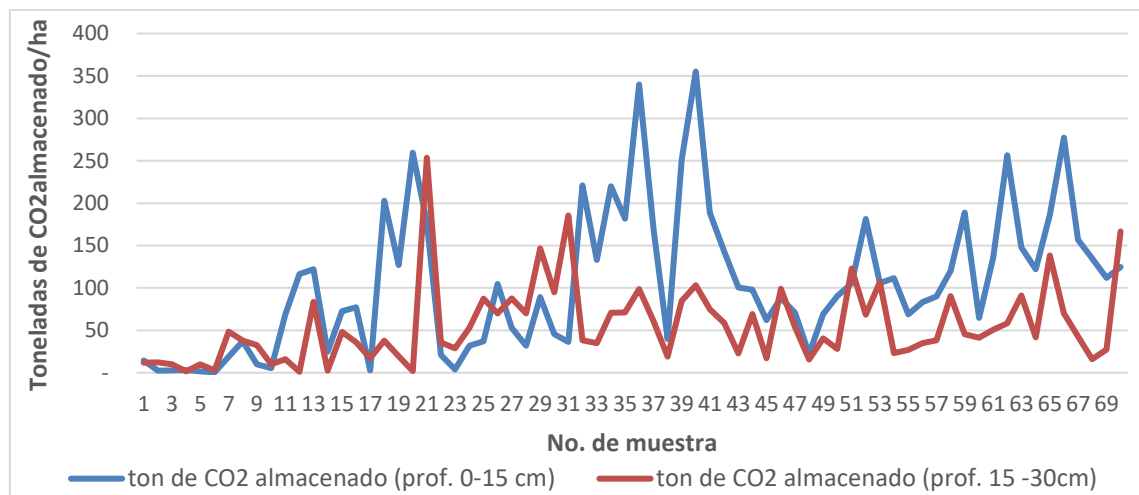
**Figura 13.** Toneladas de CO<sub>2</sub> almacenado – Fracción Carbono extractable

---

<sup>117</sup> SCHLATTER, J. & OTERO, L. Efecto de *Pinus radiata* sobre las características químico- nutritivas del suelo mineral superficial. Bosque.1995. 16(1). 29-46p.

<sup>118</sup> GADGIL, R. & GADGIL, P. "Suppression of litter decomposition by mycorrhizal roots of *Pinus radiata*". N.Z. J. of For. Sci. 1975. 5(1). 33-41p.

<sup>119</sup> Guo, L. & Gifford, R. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. Global Change Biology. 2002. 8. 345-360p.



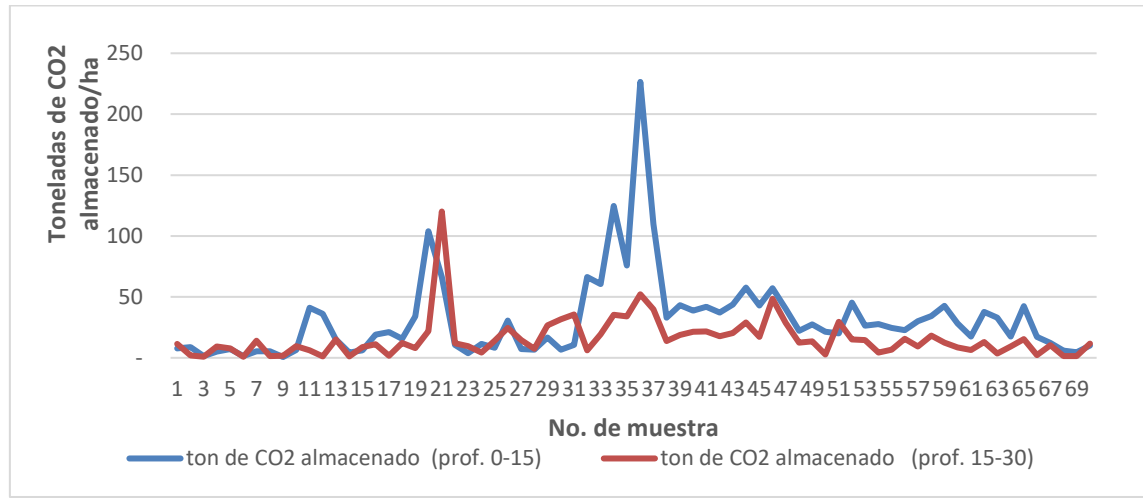
Los valores que le siguen en inferioridad son 1.51, 2.41, 2.81, 2.95, 3.31, 3.87 (Figura 13); los cuales corresponden a los puntos de muestreo con cobertura vegetal conformada por pastizales y con menor gradiente altitudinal (valores entre 3104 – 3198m.s.n.m) favoreciendo el acceso para la utilización en actividades pecuarias, las cuales degradan el suelo, favoreciendo la erosión y la compactación de los suelos por el pisoteo, y por ende la disminución en la capacidad del almacenar carbono. Carvajal et al.<sup>120</sup> señala que la ganadería tiene efectos profundos en la estructura y funcionamiento de los páramos, donde el pisoteo de los animales genera compactación del suelo y pérdida de las propiedades físicas, químicas y biológicas retenedoras de agua y carbono. Los valores más altos corresponden a 355.21, 339.74, 277.10, 259.64, 256.65, 251.36 ton/ha de CO2 almacenado, con cobertura representada por vegetación nativa y gradiente altitudinal entre 3356 y 3785.

### 8.3.2 Toneladas por hectárea de CO2 almacenado en la fracción de ácidos fúlvicos

De acuerdo con la figura 14, se presenta un comportamiento muy similar en las dos profundidades analizadas, observándose tres picos en con valores de 226.49, 124.53, 120.11 y 103.86, correspondientes a la cobertura de vegetación nativa y son los mismos puntos que presentan los datos más elevados en cuanto al contenido de carbono almacenado en la fracción carbono extractable.

<sup>120</sup> CARVAJAL, A. et al. Op. Cit.

**Figura 14.** Toneladas de CO2 almacenado - Fracción ácidos fúlvicos

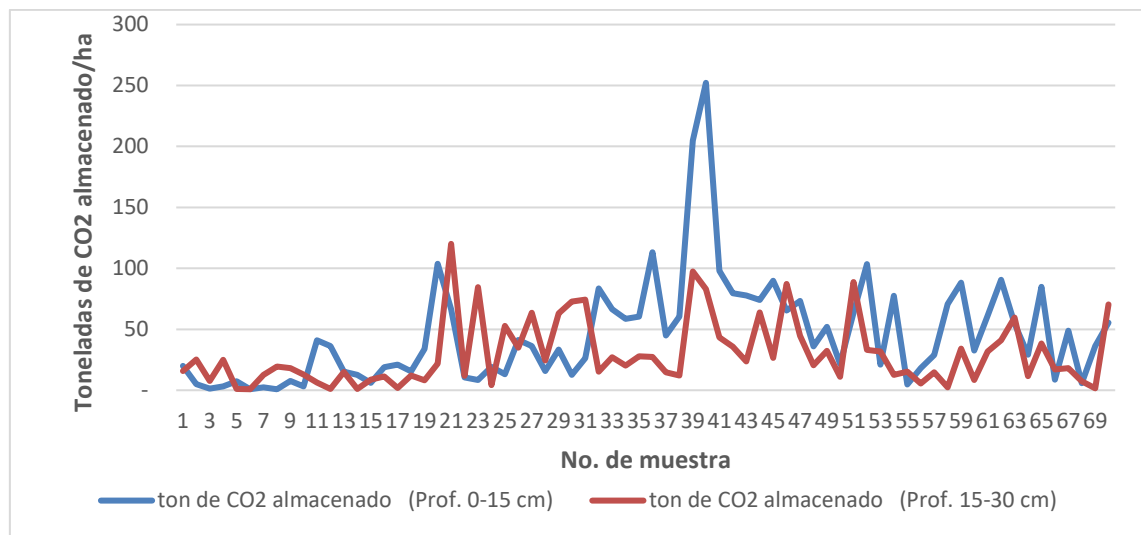


Los valores registrados para la fracción de ácidos fúlvicos son mayores en la superficie del suelo, donde a profundidad de 0-15 cm oscilan entre 0,65 y 226,49 ton CO2 almacenado/ha y para el caso de profundidad de 15-30cm entre 0,84 y 120,11 ton CO2 almacenado/ha. En comparación con las otras fracciones, los ácidos fúlvicos fue la fracción que presentó la menor cantidad de ton de CO2 almacenado/ha.

### 8.3.3 Toneladas por hectárea de CO2 almacenado en la fracción de ácidos húmicos

La figura 15 muestra los valores de las toneladas de CO2 almacenado, teniendo en cuenta la fracción de ácidos húmicos, cuyas profundidades presentan un comportamiento similar, presentando puntos donde la profundidad de 0-15cm sobrepasa a la de 15-30 cm y viceversa. Se registraron datos entre 0.86 y 252,21 para la primera y 0.84 a 120,11 ton de CO2 almacenado por ha para la segunda.

**Figura 15.** Toneladas de CO2 almacenado - Fracción ácidos húmicos



Los puntos más altos coinciden con las coberturas de vegetación nativa y mayor rango altitudinal y los más bajos con el cultivo de pino y los pastizales. Las áreas de cultivos tienen rangos de almacenamiento de CO<sub>2</sub> relativamente medios, en comparación con las otras dos coberturas vegetales.

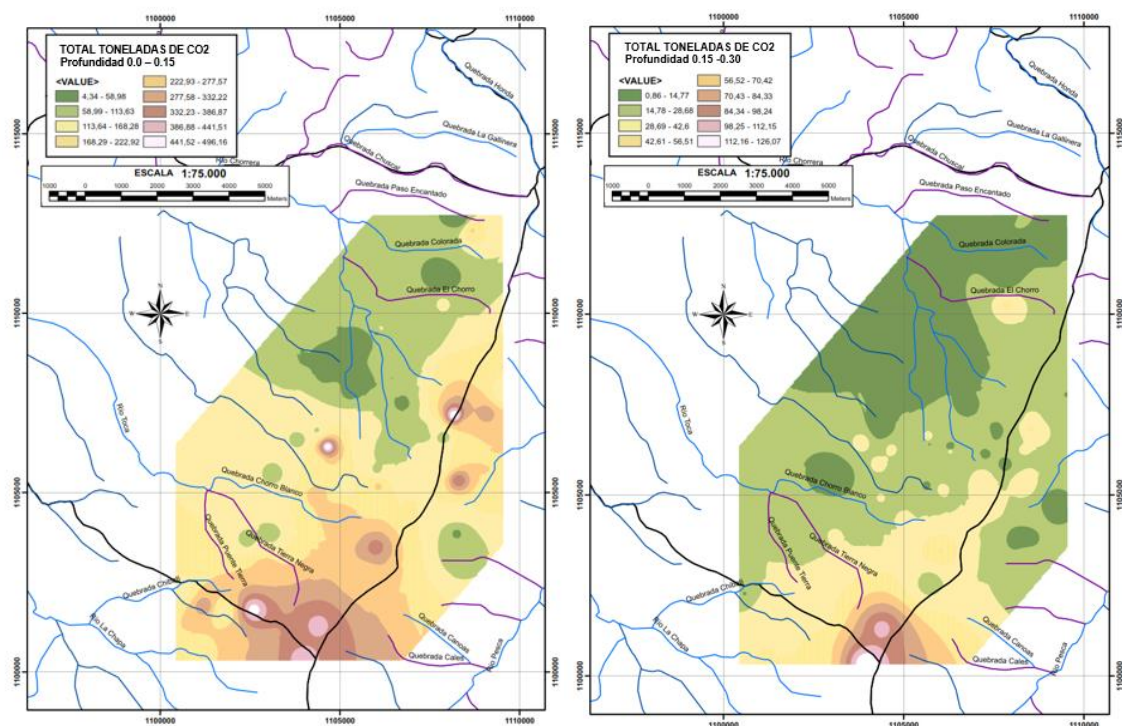
#### 8.3.4 Total de toneladas por hectárea de CO<sub>2</sub> almacenado en el suelo del área de estudio del páramo la Cortadera

En la Figura 16 se muestra la relación del total de toneladas de CO<sub>2</sub> almacenado en el suelo, luego de realizar los cálculos correspondientes y utilizar técnicas de interpolación con herramientas de sistemas de información geográfica, donde los tonos blanco y rosado son los que presentan los valores más altos, los naranjas valores medios y la tonalidad verde los más bajos.

Se observó que la profundidad de 0 – 15 cm es la que almacena mayor concentración de CO<sub>2</sub>, en mayor área del polígono, en comparación con la de 15 - 30cm, lo cual coincide con lo expresado por coincide con los resultados reportados por Handayani et al.<sup>121</sup> quienes evidenciaron que, en la mayoría de los casos, las concentraciones de carbono fueron superiores en las muestras tomadas de 0 -15cm que en las de 15 – 30cm, cuyo comportamiento se debe al aporte de la hojarasca, producción y exudación de raíces, las cuales una vez en el suelo se metabolizan y son mineralizadas por los microorganismos.

<sup>121</sup> HANDAYANI, I. et al. Soil organic matter fractions and aggregate distribution in response to tall fescue stands. Plant and soil science faculty publications. 2010. 5(1): 1-10

**Figura 16.** Total de toneladas de CO<sub>2</sub> almacenado – profundidad 0-15cm vs 0-30cm



Según Van Bremen & Feijtel (citados por Segura et al.<sup>122</sup>) el sistema suelo-vegetación juega un papel importante en el aumento o en la reducción de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, dependiendo de la velocidad de formación y descomposición del carbono orgánico en el suelo (COS)); razón por la cual, de acuerdo con Post et al. (citados por Segura et al.<sup>123</sup>) el recurso suelo es uno de los reservorios terrestres de C más grandes; además Kern (citado por Segura et al.<sup>124</sup>), afirma que es el medio para evaluar el flujo de gases invernadero entre la biosfera y la atmósfera. Ante el incremento de la cantidad de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y la recomendación que se planteó en el Protocolo de Kyoto del Intergovernmental Panel on Climate Change, se ha extendido el interés en la dinámica del COS en el mundo, buscándose alternativas para su captura.

#### 8.4 TENDENCIAS ESPACIALES DEL CARBONO ORGANICO PRESENTE EN LAS FRACCIONES

<sup>122</sup> SEGURA – CASTRUITA, M.; SANCHEZ – GUZMÁN, P.; ORTIZ -SOLORIO, C. & GUTIÉRREZ – CASTORENA, M. Carbono orgánico de los suelos de México. Terra Latinoamérica. 2005. 23(1).

<sup>123</sup> Ibid.

<sup>124</sup> Ibid.

Para analizar las diferentes tendencias espaciales del carbono orgánico presente en las fracciones, se obtuvieron mapas empleando técnicas de interpolación, en los cuales los tonos blanco y rosado, presentan los valores más altos; los naranjas valores medios y la tonalidad verde los más bajos.

#### 8.4.1 Cambios en la cobertura vegetal del Páramo de la Cortadera

Para evaluar los cambios de cobertura vegetal en el Páramo La Cortadera se contó con información (imágenes satelitales) correspondiente a los años 1985 y 2017.

De acuerdo con el análisis comparativo de las coberturas vegetales, entre los años 1.985 y 2.017) a través de las imágenes satélites, se observa que en el año 1.985 (figura 17) existía un parche alargado de vegetación nativa, el cual estaba rodeado de área abierta con presencia de poca vegetación.

Para el año 2.017 (figura 18) dicho relicto vegetal se observa disminuido considerablemente y se presenta un aumento notable de la vegetación herbácea, lo cual posiblemente se debe al incremento de cultivos y zonas de pastizales.

**Figura 17.** Imagen satelital del Páramo de La Cortadera – Boyacá. Año 1.985

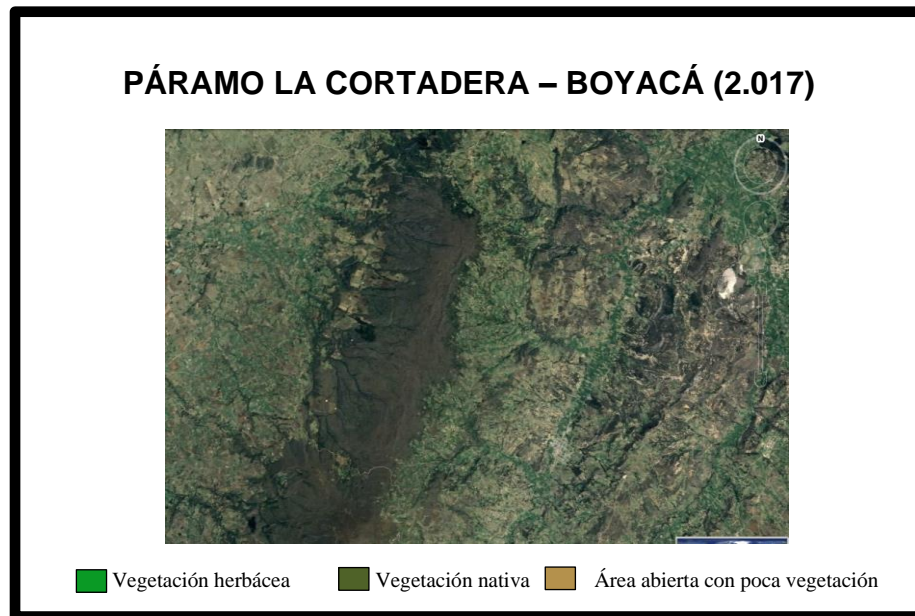


Fuente: Adaptada de Guio (2019)<sup>125</sup>

<sup>125</sup> GUIO, V. Determinación y mapificación de pérdidas de suelo en la cuenca del Embalse de la Copa. Facultad de Ingeniería. 2019. Tesis de Maestría. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja.



**Figura 18.** Imagen satelital del Páramo de la Cortadera – Boyacá Año 2.017



Fuente: Google Earth <sup>126</sup>

Así mismo, se observa colonización de especies en aquellas áreas que estaban descubiertas, sin embargo, de acuerdo a lo observado in situ, se evidencia que está vegetación no es propia de páramo. Según Barrera y Monroy<sup>127</sup> la vegetación de páramo en La Cortadera se está viendo gravemente afectada por las producciones ganaderas, principalmente de bovinos, porque el ramoneo y pisoteo conllevan a la pérdida y reemplazo de la vegetación natural, en especial porque La Cortadera es un páramo seco.

#### **8.4.2 Carbono orgánico presente en la fracción carbono extractable**

De acuerdo con la figura 19, se realizó una comparación de las concentraciones de carbono orgánico presente en la fracción de carbono extractable, a dos profundidades, donde se evidencia que la profundidad de 0-15, los valores oscilan entre 0,14 y 48,38 ton/ha de carbono; mientras que de 15 – 30 cm, están en el rango de 0,5 a 90,5 ton/ha de carbono, demostrando que la zona de la parte baja derecha del polígono es donde se presentan las mayores concentraciones de carbono orgánico en el suelo, mientras que la parte alta izquierda del polígono presentó los

<sup>126</sup> GOOGLE EARTH.

<sup>127</sup> Barrera, Héctor; Monroy, Juan. Análisis del impacto de la explotación bovina sobre el ecosistema del páramo la cortadera Toca Boyacá. 2012. Tesis Doctoral.



valores más bajos, las cuales corresponden en su mayoría a zonas de cultivos y ganadería, sugiriendo que éstas áreas requieren de un manejo que permita al suelo mejorar sus condiciones, y por ende, almacenar carbono en mayores concentraciones.

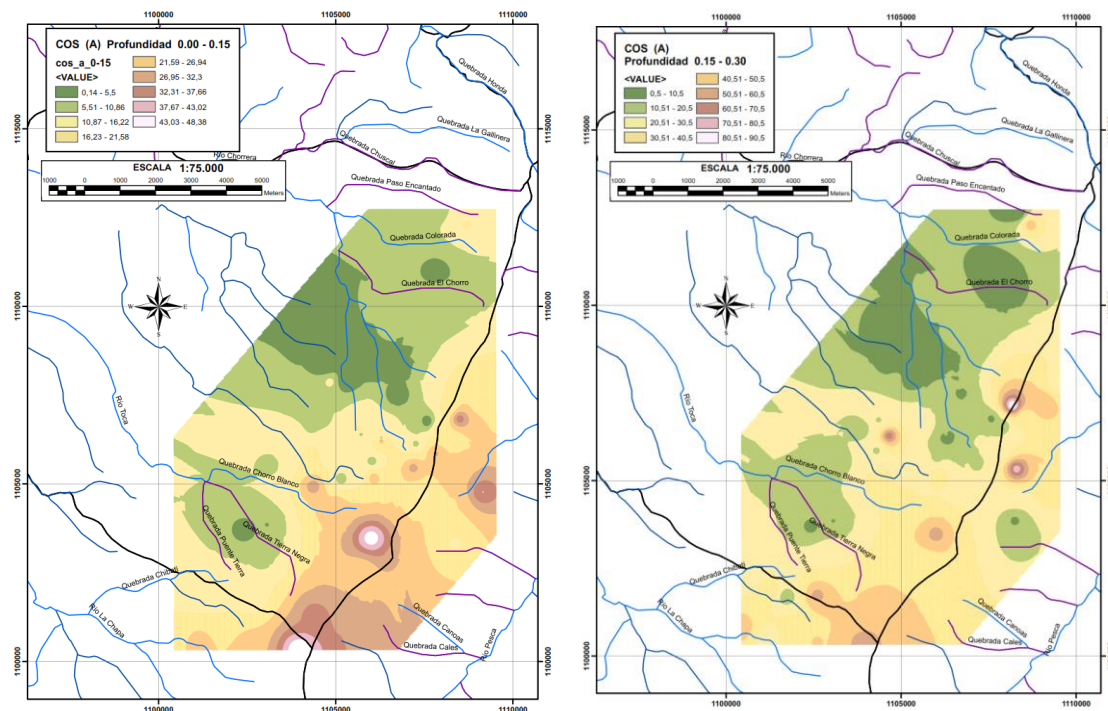
La figura 19 evidencia que las áreas de ganadería analizadas no están almacenando cantidades significativas de carbono, lo cual coincide con los resultados de la investigación realizada por Ibrahim et al.<sup>128</sup>, donde en cada uno de los paisajes ganaderos analizados las pasturas degradadas no están aportando significativamente al secuestro de carbono, mientras que las pasturas mejoradas con árboles y los sistemas silvopastoriles son usos de la tierra con mayores potenciales.

El establecimiento de pasturas mejoradas con alta densidad de árboles presentó un alto potencial de secuestro de carbono, el cual se podría incrementar a nivel de finca y de paisaje insertando pequeñas áreas de plantaciones forestales y liberando otras áreas para dar paso a la regeneración natural del bosque. Por lo anterior, se considera una estrategia de manejo que puede ser puesta en práctica en las zonas destinadas para la ganadería en el Páramo de La Cortadera, con el fin de favorecer la captación y almacenamiento de carbono.

**Figura 19.** Carbono orgánico del suelo – Fracción carbono extractable a profundidad 0-15 cm vs profundidad 15 – 30cm

---

<sup>128</sup> IBRAHIM, M. et al. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. Agroforestería en las Américas N ° 45. 2007



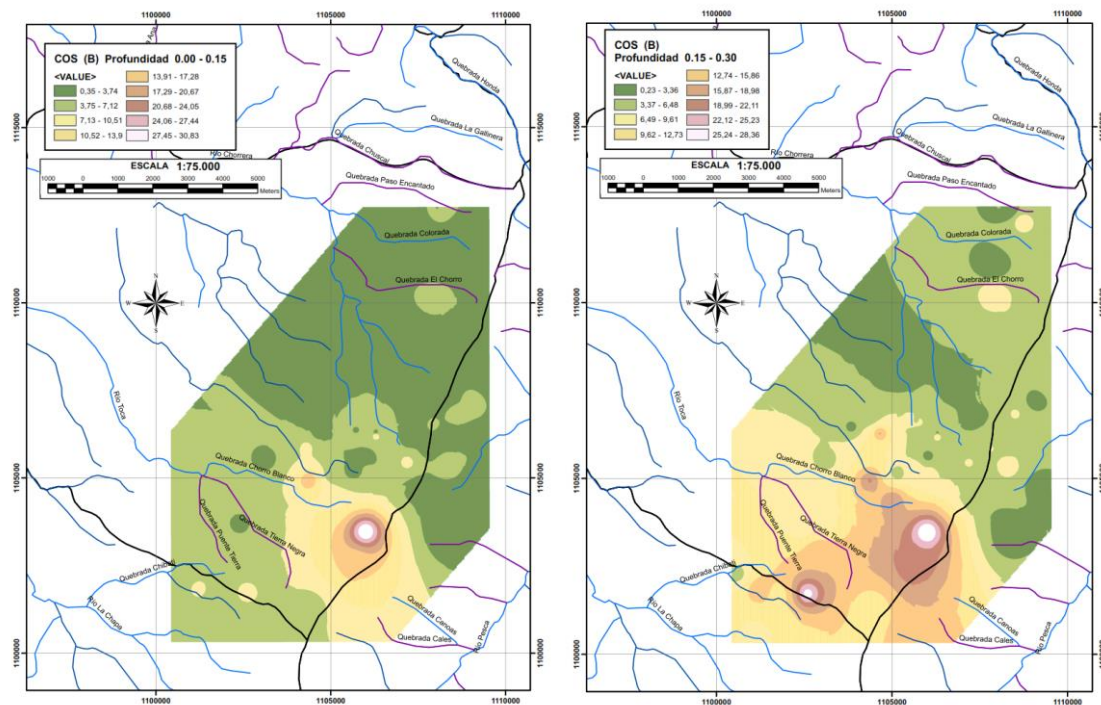
Según Reicosky<sup>129</sup>, se estima que desde que se incorporan nuevos suelos a la agricultura hasta establecer sistemas intensivos de cultivo se producen pérdidas de COS que fluctúan entre 30 y 50% del nivel inicial, de la misma manera la pérdida de material húmico de los suelos cultivados es superior a la tasa de formación de humus de suelos no perturbados por lo que el suelo, bajo condiciones de cultivo convencionales, es una fuente de CO<sub>2</sub> para la atmósfera.

### 8.4.3 Carbono orgánico del suelo presente en la fracción ácidos fúlvicos

En la figura 20, se observa la comparación de las concentraciones de carbono orgánico en la fracción de ácidos fúlvicos, se evidencia donde se resalta el suelo a dos profundidades; cuyos valores para la profundidad 0-15 cm oscilan entre 0,35 – 30,83 ton de carbono/ha, mientras que para 15 – 30 cm están en el rango de 0,23 – 28,36 ton de carbono/ha.

**Figura 20.** Carbono orgánico del suelo – Fracción ácidos fúlvicos a profundidad 0 - 15 cm vs. profundidad 15 – 30 cm

<sup>129</sup> REICOSKY, D. C., 2002. Long – Term Effect of Moldboard Plowing on Tillage – Induced CO<sub>2</sub> Loss, in J. M. Kimble, R. Lal and R. F. Follet: Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil. Lewis Publishers. Papers from symposium held July 1999 at Ohio State University, Columbus, Ohio, 87-96 p.



Los valores a las dos profundidades son relativamente similares, presentando rangos un poco más altos en la profundidad de 15 – 30 cm; así mismo, esta porción de suelo presenta mayor extensión de ecosistemas almacenadores de CO<sub>2</sub>, en relación con el área del polígono y con la otra profundidad. La mayor parte del área de la profundidad de 0 – 15 cm presenta rangos de carbono orgánico muy bajos en comparación con las otras fracciones.

El círculo de color blanco muestra el punto con los valores más altos, en las dos profundidades el cual corresponde a cobertura nativa, lo cual evidencia la necesidad de proteger éste tipo de vegetación, pues son de gran importancia en el secuestro de CO<sub>2</sub> atmosférico. Rondón<sup>130</sup> afirma que, si la cobertura vegetal del páramo desaparece por cualquier causa, la superficie quedaría expuesta a la acción directa del sol, lo que propiciaría la desecación del suelo, cambiando su estructura y permitiendo que la materia orgánica se descomponga más rápidamente. Además, según Tan et al.<sup>131</sup> el color negro de los suelos del páramo debido a la alta concentración de compuestos húmicos favorecería la absorción de la radiación

<sup>130</sup> RONDÓN, M. Op. Cit.

<sup>131</sup> TAN, Z. et al. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. Soil & Tillage Research. 2007. 92: 53-59

solar, generando un aumento en la temperatura del suelo que, unida al aumento de la temperatura del ambiente, aceleraría los procesos microbiológicos de descomposición y la oxidación de la materia orgánica, liberando grandes cantidades de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

#### **8.4.4 Carbono orgánico del suelo presente en la fracción ácidos húmicos**

La figura 21 muestra el carbono orgánico presente en la fracción de ácidos húmicos a las dos profundidades, observándose que la más superficial presenta rangos entre 0,23 y 34,34 y la de 15 – 30 cm valores que oscilan entre 0,23 y 53,02, correspondiendo a valores medios al comparar las coberturas. Así mismo, se evidencia que para el caso de esta fracción se observan mayores tasas de mineralización de carbono en la profundidad de 15 - 30, lo cual se debe a que por procesos naturales propios y al ser esta fracción más estables tienden a migrar hacia la profundidad.

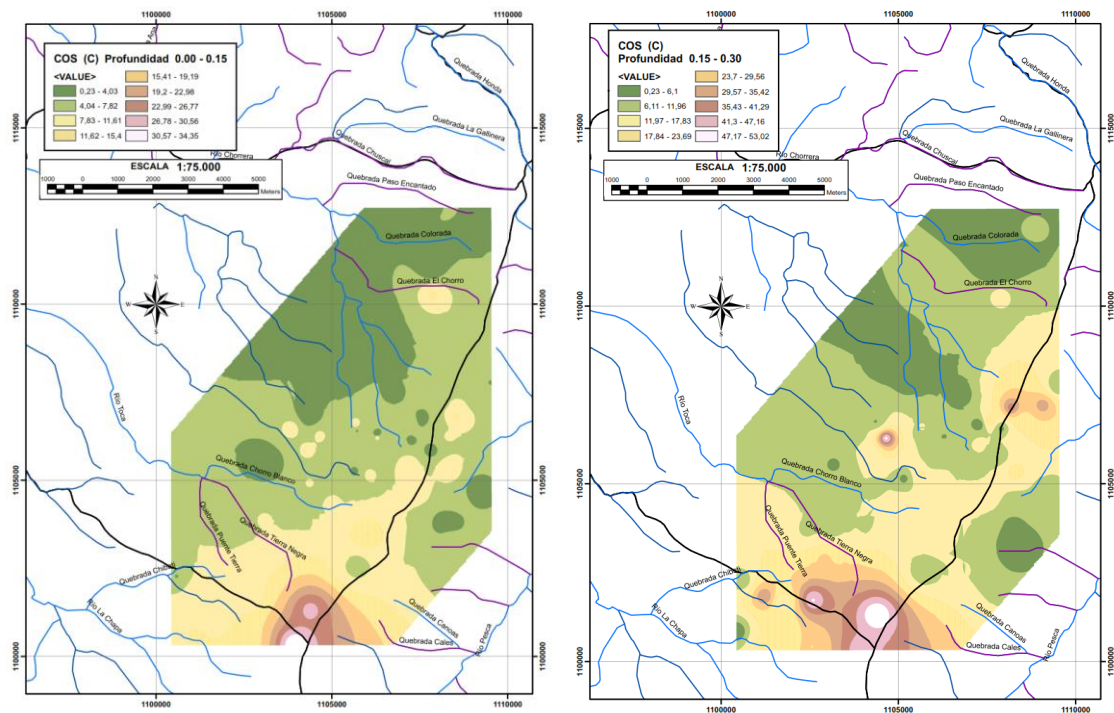
El color verde indica que existen muy bajas tasas de mineralización demostrando que en el páramo La Cortadera, se presenta una problemática ambiental reflejada en la ampliación de la frontera agropecuaria; teniendo en cuenta que los suelos de las áreas bajas están degradados, los agricultores extienden sus cultivos y zonas de pastoreo a sectores por encima de los 3500m.s.n.m., lo cual ha requerido la remoción y quema de la vegetación, desplazamiento del mantillo y arado del suelo.

Según la FAO<sup>132</sup>, la producción agropecuaria tiene unos profundos efectos en el medio ambiente en conjunto, ya que son la principal fuente de contaminación del agua por nitratos, fosfatos y plaguicidas, son la mayor fuente antropogénica de gases responsables del efecto invernadero, metano y óxido nitroso, y contribuyen en gran medida a otros tipos de contaminación del aire y del agua. Así mismo, la agricultura afecta también a la base de su propio futuro a través de la degradación de la tierra, la salinización, el exceso de extracción de agua y la reducción de la diversidad genética agropecuaria. Si se utilizan más métodos de producción sostenible, se podrán atenuar los efectos de la agricultura sobre el medio ambiente.

**Figura 21.** Carbono orgánico del suelo – Fracción ácidos húmicos a profundidad 0 - 15 cm vs. profundidad 15 - 30 cm

---

<sup>132</sup> Ibid.



El uso inadecuado del suelo en Colombia, el cual cubre cerca del 28% del territorio, es un factor de calentamiento global. Cuando se somete un suelo a procesos de labranza, ganadería intensiva y sin prácticas de manejo, el contenido de carbono se va perdiendo, su capacidad productiva disminuye y se degrada<sup>133</sup>. Martín<sup>134</sup> comenta que, por la presión antrópica sobre la tierra, muchas zonas se han adaptado para la actividad agropecuaria, con la consiguiente pérdida de la estructura del suelo, de retención de agua y carbono por la materia orgánica y alteración de los ciclos biogeoquímicos. Ayala et al.<sup>135</sup> reportan que las actividades de cambio de uso del suelo contribuyen al cambio climático y el uso del suelo se puede ver afectado por el cambio climático, por lo tanto, unas adecuadas estrategias de uso del suelo podrían ayudar a mitigar este fenómeno.

Es de anotar, que el aire del suelo tiene una composición similar a la de la atmósfera, pero difiere en la concentración de los gases. El aire del suelo tiene una mayor concentración de CO<sub>2</sub> respecto al aire atmosférico. Los gases entran o salen del

<sup>133</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE Y PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO. 2002. Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en condición Hot Spot & Global Climatic Tensor. IDEAM – Colombia

<sup>134</sup> MARTÍN, F. Estudio de dos fracciones de ácidos fúlvicos de suelos podsólicos. Anales de edafología y agrobiología. Sf. 399-406

<sup>135</sup> AYALA, L. et al. Cuantificación del carbono en los páramos del parque nacional Yacuri, provincias de Loja y Zamora Chinchipe, Ecuador. Revista CEDEMAZ, 2014. 45-52

suelo por flujo de masa y por difusión. El flujo de masa se produce debido a variaciones de temperatura y de presión entre las distintas capas del suelo y entre éste y la atmósfera, hacen que entre y salga aire del suelo arrastrando a todos sus componentes<sup>136</sup>.

---

<sup>136</sup> HEALY, R.W., STRIEGL, R.G., RUSSELL, T.F., HUTCHINSON, G.L., LIVINGSTON, G.P., 1996. Numerical evaluation of static-chamber measurements of soil-atmosphere gas exchange: Identification of physical processes. Soil Sci. Soc. Am. J. 60, 740-747.

## 9. CONCLUSIONES

- Los suelos con vegetación nativa presentaron mayor porcentaje de carbono en comparación con aquellos utilizados para actividades agropecuarias, evidenciándose que la cobertura e intervención influye directamente en la capacidad de captura de carbono por parte del suelo.
- El carbono extractable, fue la fracción que presentó mayor potencial de captura de CO<sub>2</sub> con valores de 355,21 ton.ha<sup>-1</sup> a profundidad de 0-15 cm y 253,56 de 15-30 cm, lo cual se debe a que corresponde a la materia orgánica más estable.
- La fracción de ácidos húmicos presentó valores de 252,21 ton CO<sub>2</sub>.ha más altos que los fúlvicos con 226,49 ton CO<sub>2</sub>.ha, debido a que la primera contiene mayor cantidad de carbono y menos oxígeno.
- El páramo de La Cortadera es un ecosistema de gran importancia por los servicios ecosistémicos que presta, pero a la vez, es muy vulnerable por el alto impacto antrópico, por lo tanto, se debe propender por conservarlo y protegerlo, debido a que contiene fracciones lábiles de carbono que pueden ser devueltas directamente a la atmósfera, favoreciendo el cambio climático y efecto invernadero.
- El carbono orgánico del suelo obtenido evidencia una disminución en aquellos suelos usados para actividades agropecuarias, influyendo en las condiciones edafoclimáticas de la región, por lo cual se hace necesaria la generación de planes de control del uso del suelo en el Páramo de La Cortadera.
- Se hace necesario elaborar una línea base nacional de almacenamiento de carbono en el suelo, que permita la construcción y validación de modelos, para realizar predicciones a futuro y simular escenarios relacionados con la captura de CO<sub>2</sub> según las características climáticas, fisiográficas y de usos y coberturas vegetales de un determinado ecosistema del territorio.
- El manejo inadecuado del suelo dedicado al cultivo y pastoreo ha conllevado a la reducción del contenido de materia orgánica, y por ende de carbono

orgánico, situación que puede alterar las propiedades físicas y químicas del suelo, contribuyendo a la pérdida de su calidad.

- A pesar de que se conoce la capacidad que tienen los bosques y algunos sistemas silvopastoriles para almacenar carbono, aún falta información acerca del potencial de secuestro de carbono en suelo y en la biomasa arbórea de los sistemas de uso de la tierra predominantes en paisajes dominados por la ganadería. Por ello, Es de gran importancia que en Colombia se cuente con información sobre las reservas de carbono orgánico, lo que permitiría hacer un mejor uso de las tierras, plantear estrategias de manejo, plantear actividades de mitigación y adaptación al cambio climático regionales y buscar incluir estos ecosistemas en proyectos de pagos por servicios ambientales.



## **10.RECOMENDACIONES**

- Establecer un mayor número de muestreo en parcelas, para poder emplear otras herramientas de interpolación.
- Plantear proyectos de conservación de sumideros de carbono e incluir éste ecosistema como zona de almacenamiento de carbono, con base en los resultados obtenidos en la presente investigación.
- Continuar realizando éste tipo de investigaciones, en todos los ecosistemas de Colombia, para tener un conocimiento más aproximado de la capacidad de secuestro de carbono.
- Emplear en futuros estudios la técnica de fraccionamiento de carbono orgánico utilizada en esta investigación, teniendo en cuenta que es relativamente sencilla de realizar y brinda una información completa.
- Es necesario que los diferentes entes gubernamentales y privados generen conciencia de protección y conservación con la comunidad circundante al páramo, principalmente con aquellas que realiza actividades de tipo agropecuario.
- Recuperar las zonas del Páramo de La Cortadera que actualmente se observan degradadas y por ende mostraron los valores más bajos de captura de carbono, bien sea de manera pasiva natural.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

ACCEFY. Inventario preliminar de gases de efecto invernadero. Fuentes y sumideros: Colombia, 1990. Academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales.

AGUILERA, S. Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. En: Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo. Boletín N° 14, 2000. Valdivia, Chile. p. 77-85.

ALVARADO, J; ANDRADE, H. & SEGURA, M. Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. Colombia forestal, 2013. 16(1): 21-31

AMAR AS citado por MATALLANA, C. Concepto previo declaratoria Parque Natural Regional Cortadera. Del instituto Alexander von Humboldt a la Corporación Autónoma Regional de Boyacá. 2009

ASOCARS. CUMBRE MUNDIAL SOBRE DESARROLLO SOSTENIBLE. RECOPIACIÓN DE MATERIALES RELEVANTES PARA EL PROCESO PREPARATORIO DE Río. El conversatorio Año 1 No. 1: Bogotá, Colombia. 2002

AYALA, L; VILLA, M; AGUIRRE, Z. & AGUIRRE, N. Cuantificación del carbono en los páramos del parque nacional Yasuni, provincias de Loja y Zamora Chinchipe, Ecuador. Revista CEDEMAZ, 2014. 45-52

BALESDENT, J., ARROUAYS, D., GAILLARD, J. Morgane: un modèle de simulation des réserves organiques des sols et de la dynamique du carbone des sols. *Submitted to Agronomie. 2000.*

BANEGAS, N., ALBANESI, A., PEDRAZA, R., NASCA, J. & TORANZOS, M. Determinación de fracciones de carbono edáfico en un sistema pastoril bovino de la Llanura Deprimida Salina de Tucumán, Argentina. Sitio 2000 Argentino de Producción Animal APPA - ALPA - Cusco, Perú.

CARGUA, F; RODRÍGUEZ, M; RECALDE, C. & VINUEZA, L. Cuantificación del contenido de carbono en una plantación de pino insignia (*Pinus radiata*) y en estrato de páramo de Ozogoché Bajo, Parque Nacional Sangay, Ecuador.

CARTER, M.R. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. Agron. J. 2002, 94, 38-47.

CARVAJAL, A., FEIJOO, A., QUINTERO, H. & RONDON, M. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. En: Rev. Cienc. Suelo Nutr. 2009. vol 9, no 3, p. 222-235.

CASTAÑEDA-MARTÍN, A., MONTES-PULIDO, C.R. Carbono almacenado en páramo andino. Entremado. 2017. Vol 13 (1): 210-221

CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA, 2005.  
<http://www.cepis.ops-oms.org>

CELY, G.; LOPEZ, J.; SERRANO, P.; BERNAL, O.; CELY, O.; MORENO, D. Suelos de los páramos de Boyacá: Ecosistemas potenciales para la captura de carbono. Primera Edición. Editorial Jotamar Ltda. 2016. 255p.

CHAMORRO, C. Efecto del uso del suelo sobre la composición edofaunística de los páramos que circundan la ciudad de Bogotá. En: Suelos Ecuatoriales. 1989. vol XIX, no. 1, p. 48-62.

COMUNIDAD ANDINA DE NACIONES. Impacto del Cambio Climático en la Comunidad Andina disponible en: [www.comunidadandina.org](http://www.comunidadandina.org). 2008

CORPOBOYACA & ECOSISTEMA COLOMBIA. Evaluación del Estado de Conservación de Cuatro Especies de Frailejones Amenazadas (*Espeletia paipana*, *Espeletia chocontana*, *Espeletia oswaldiana*, *Espeletia brachyaxiantha subsp. pescana*) del Departamento de Boyacá. 2008. Tunja.

DEB MORAES, J. C., LAL, R., CERRI, C.C., LORENZ, K., HUNDRIA, M., CESAR, P. & CARVALHO, F. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. Environment international 2017 98: 102-112

DÍAZ, M., NAVARRETE, J. & SUÁREZ, T. Páramos: Hidrosistemas Sensibles. En: Revista de Ingeniería. Noviembre 2005, No. 22, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes.

DIEKOW, J., MIELNICZUK, J., KNICKER, H., BAYER, C, DICK, D.P., KO GEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. Soil and Tillage Research, 2005. 81, 87-95.

FAO. Soil carbon sequestration for improved land management. World soil reports 96. Rome, 2001. 58 p.

FRANZLUBBERS A. J. & ARSHAD M. A. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture. En: Soil Sci. Soc. Am. J., 1999. vol 61, p. 1382-1386.

GADGIL, R.L., P.D. GADGIL. "Suppression of litter decomposition by mycorrhizal roots of *Pinus radiata*". N.Z. J. of For. Sci. 1975. 5(1). 33-41p.

GALVIS, M. & MORALES, M. Páramos de Boyacá: Flora representativa. Primera edición. Corpoboyacá. 2010. 226p.

GONZALEZ - OSORIO, H.; ZAPATA - HERNANDEZ, R. & SADEGHIAN-KHALAJABADI, S. Caracterización de los ácidos húmicos en suelos de la zona cafetera de Caldas. Cenicafé. 2009. 60(1). 25-40p.

HANDAYANI, I; COYNE, M & TOKOSH, R. Soil organic matter fractions and aggregate distribution in response to tall fescue stands. Plant and soil science faculty publications. 2010. 5(1): 1-10

HERRERA, A., CORREA, A., & DE YUNDA, A. Distribución de fracciones de tamaños moleculares de ácidos húmicos y fúlvicos. Revista Colombiana de Química, 2003. 32 (1).

HOFSTEDE, R "La importancia Hídrica del Páramo y aspectos de su manejo". 1er Paramo Electronic Forum, CONDESAN. 1997.

HOFSTEDE, R. G. M. & SEVINK, J. Effects of Burning and Grazing on a Colombian Param Ecosystem. Ámsterdam, Tesis de PhD. Universitet van Ámsterdam, 1995. 198 p.

IBRAHIM, M., CHACÓN, M., CUARTAS C., NARANJO.J., PONCE, G., VEGA, P., CASASOLA, F. & ROJAS, J. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. Agroforestería en las Américas, 2007. N ° 45. 2007.

IGLESIAS, J. O., GALANTINI, J. A., & VALLEJOS, A. Cambios en la estabilidad de agregados de suelos con diferente labranza. 2018

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE Y PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO. 2002. Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en condición Hot Spot & Global Climatic Tensor. IDEAM – Colombia.

INSTITUTO ECUATORIANO FORESTAL DE ÁREAS NATURALES Y VIDA SILVESTRE & GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY, 1996. Guía para los Páramos del Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTIN CODAZZI, 1973. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Bogotá, p. 172.

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos, 1990. Bogotá, Colombia.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2001. Tercer informe de evaluación. Cambio Climático 2001. La base científica. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. OMM-PNUMA.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. Disponible en: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).

KINKA, K.; GREEN, R., TROWBRIDGE, L. & LOWE, L. Taxonomic classification of humus forms in ecosystems o British Columbia. First aproximation. Province of British Columbia. Ministry or forest, 1981. Vancouver, Canada.

LAL, R. & KIMBLE J. Pedospheric processes and the carbon cycle. En: Lal, R; Kimble, KM; Follett, RF; Stewart, BA. eds. Soil processes and the carbon cycle. Estados Unidos, CRC Press.1998, p. 1 - 8.

LAL, R., ECKERT, D., FAUSEY, N., EDWARDS, W. Conservation tillage in sustainable agriculture. In: C. A. Edwards, R. Lal, P. Madden, R. H. Miller and G. House, Sustainable Agriculture Systems. Soil and Water Conservation Society, Iowa, USA, 1990. pp. 203-225.

LOZANO, Z; RIVERO, C; BRAVO, C. & HERNÁNDEZ, R. Fracciones de la materia orgánica del suelo bajo sistemas de siembra directa y cultivos de cobertura. Revista Fac. Agronómica, 2011. 28: 35-56

MALAGON, D. Ensayo sobre topología de suelos colombianos – Énfasis en génesis y aspectos ambientales. En: Rev. Acad. Colomb. Cienc. 2003. vol 27 no. 104, p. 319-341.

MANAHAN, S. Introducción a la química ambiental. México: Universidad Autónoma.: Editorial Reverté, 2007. p. 725.

MÁRQUEZ, L.E. & CELY, G.E. El páramo y su potencial de captura de carbono; experiencia páramo La Cortadera-Boyacá. Memorias Congreso de investigación y pedagogía III nacional y II internacional. 2013.

MARTINEZ, E., FUENTE, J. & ACEVEDO, E., 2008. Carbono Orgánico y Propiedades del Suelo. En: R. C. Suelo Nutr. Veg., 2008, vol.8, no.1, p. 68-96.

MEDINA, G., MENA, P. & JOSSE, C. 1999. El Páramo como espacio de mitigación de carbono atmosférico. Serie Páramo 1. 1999. GTP/Abya Yala. Quito.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE Y BANCO MUNDIAL. Estudio de estrategia nacional para la implementación del MDL en Colombia. Informe final. Abril de 2000. Bogotá, Colombia.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Programa para el Manejo Sostenible y Restauración de Ecosistemas de Alta Montaña: Páramos. 2001.

MONTES-PULIDO, C., RAMOS-MIRAS, J. & SAN JOSÉ-WERY, M. Estimation of soil organic carbon (SOC) at different soil depths and soil use in the Sumapaz paramo, Cundinamarca – Colombia. Acta Agronómica. 2017. 66(1): 95-101

MORALES M., OTERO J., VAN DER HAMMEN T., TORRES A., CADENA C., PEDRAZA C., RODRÍGUEZ N., FRANCO C., BETANCOURTH J.C., OLAYA E., POSADA E. & CÁRDENAS L. Atlas de páramos de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C. 2007. 208p.

OFICINA ARGENTINA DEL MECANISMO PARA UN DESARROLLO LIMPIO, SECRETARIA DE AMBIENTE Y DESARROLLO USTENTABLE. Proyectos forestales en el MDL. 2003

ORELLANA, G.; SANDOVAL, M., LINARES, G., GARCÍA, N. Y TAMARIZ, J. Descripción de la dinámica de carbono en suelos forestales mediante un modelo de reservorios. En: Avances en Ciencias e Ingeniería. Enero - Marzo, 2012. Vol. 3, no. 1, p. 123-135.

OSPINA, D. & RODRIGUEZ, C. Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia. Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial e Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander Von Humboldt. Alianza Ediprint Ltda. – Guerra Editores. Bogotá: 2011. 68p.

PARENT, S-E. & PARENT, L. Biochemical fractionation of Soil organic matter after incorporation of organic residues. Open Journal of Soil Science, 2015. 135-143

POEPLAU, C. & DON, A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. Agriculture, Ecosystems and Enviroment. 2015 (200): 33-41

POST, W. & KWON, K. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. Global Change Biology. 2000. 6: 317-327.

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE. Informe anual del PNUMA – 2007.

RANGEL, J. Colombia Diversidad Biótica V. La alta montaña de la Serranía de Perijá. Instituto de Ciencias Naturales-CORPOCESAR. Bogotá.2007. 472p.

RANGEL, J. Colombia, diversidad biótica III: La región de vida paramuna. Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Naturales- Universidad Nacional de Colombia e Instituto Humboldt. Bogotá, D. C. 2000.

RANGEL, J., LOWY, p. & AGUILAR, M. Colombia, diversidad biótica II: Tipos de vegetación en Colombia. Editorial Guadalupe Ltda., Bogotá. 1997. p. 436.

REICOSKY, D. Long – Term Effect of Moldboard Plowing on Tillage –Induced CO<sub>2</sub> Loss, in J. M. Kimble, R. Lal and R. F. Follet: Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil. Lewis Publishers. Papers from symposium held July 1999 at Ohio State University, Columbus, Ohio, 2002, 87-96 p.

ROBERT, M. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. 2000. Roma. 73 p.

RONDÓN, M. Los Páramos Andinos frente al calentamiento global. Historia de una sed anunciada. En: Revista Investigación y Ciencia. 2000. vol. IX, p. 46-53.

RUMPEL, C. & KÖGEL-KNABNER, I. Deep soil organic matter a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. Plant Soil, 2011. 338(1-2), 143-158.

SALAMANCA, S. “La vegetación del Páramo, Única en el Mundo”. En: Colombia, sus Gentes y Regiones. 1986, Vol 2.

SÁNCHEZ, J., HARWOOD, R., WILLSON, T., KIZILKAYA, K., SMEENK, J., PARKER, E., PAUL, E., KNEZEK, B., ROBERTSON, G. P. Managing soil carbon and nitrogen for productivity and environmental quality. Agron. J. 2004. 96, 769-775.

SCHLATTER, J. & OTERO, L. Efecto de *Pinus radiata* sobre las características químico- nutritivas del suelo mineral superficial. Bosque.1995. 16(1). 29-46p.

SEVINK, J. & LIPS, J. Humus forms, humus description, sampling. Documento de discusión presea grupo de trabajo sobre unificación de metodologías en las áreas de trabajo del Proyecto Tropenbos. 1987

SEGURA – CASTRUITA, M.; SANCHEZ – GUZMÁN, P.; ORTIZ -SOLORIO, C. & GUTIÉRREZ – CASTORENA, M. Carbono orgánico de los suelos de México. Terra Latinoamérica. 2005. 23(1).

SKLENÁR P., LUTEYN J., ULLOA C., JORGENSEN P., DILLON M. Flora genérica de los páramos. Guía ilustrada de plantas vasculares. The New York Botanical Garden Press. 2005. 503p.

TAN, Z; LAL, R; OWENS, L. & IZAURRALDE, R. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. Soil & Tillage Research. 2007. 92: 53-59

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES & UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA. Plan de Ordenación y Manejo Ambiental de la Cuenca Alta del Río Chicamocha. Diagnóstico. Informe final inédito. Tunja, 2006.

WARD, A., DARGUSCH, P., GRUSSU, G., & ROMEO, R. Using carbon finance to support climate policy objectives in high mountain ecosystems. Climate Policy, 2015. 16(6), 1-20.